

**Dritter Bericht**  
**der ENQUETE-KOMMISSION**  
**Vorsorge zum Schutz der Erdatmosphäre**

**zum Thema**  
**Schutz der Erde**

**gemäß Beschluß des Deutschen Bundestages vom 16. Oktober und vom**  
**27. November 1987 sowie vom 7. Dezember 1988**  
**— Drucksachen 11/533, 11/787, 11/971, 11/1351 und 11/3479 —**

## Mitglieder der Enquete-Kommission „Vorsorge zum Schutz der Erdatmosphäre“

Stand: 2. Oktober 1990

Bernd Schmidbauer, MdB (CDU/CSU)  
Vorsitzender

Dr. Liesel Hartenstein, MdB (SPD)  
Stellvertretende Vorsitzende

Herrmann Fellner, MdB (CDU/CSU)  
Dr. Klaus W. Lippold (Offenbach), MdB (CDU/CSU)  
Trudi Schmidt (Spiesen), MdB (CDU/CSU)  
Heinrich Seesing, MdB (CDU/CSU)  
Prof. Monika Ganseforth, MdB (SPD)  
Dr. Klaus Kübler, MdB (SPD)  
Michael Müller (Düsseldorf), MdB (SPD)  
Dr. Inge Segall, MdB (FDP)  
Dr. Wilhelm Knabe, MdB (DIE GRÜNEN)

Prof. Dr. Wilfrid Bach  
Prof. Dr. Dr. Paul Crutzen  
Prof. Dr. Dr. Rudolf Dolzer  
Prof. Dr. Hartmut Graßl  
Prof. Dr. Klaus Heinloth  
Prof. Dr. Peter Hennicke  
Prof. Dr. Klaus Michael Meyer-Abich, Senator a.D.  
Prof. Dr. Hans Michaelis, Generaldirektor  
Prof. Dr. Wolfgang Schikarski  
Prof. Dr. Wolfgang Seiler  
Prof. Dr. Reinhard Zellner

### Sekretariat

Bodo Bahr (Leiter)  
Hartmut Behrend  
Heiko Braß  
Dr. Wolfhart Dürschmidt  
Martina Eitzbach  
Dr. Anneke Trux  
Rainer Walz  
Renate Zimmermann  
Dieter Wehrend  
Birgit Schulte  
Anette Coppee  
Christine Dörffler

## Vorwort

Eine Chance für die Erde.

Drei Jahre nach ihrer Konstituierung, zwei Jahre nach ihrem ersten Bericht zum Thema „Schutz der Erdatmosphäre“ und nur vier Monate nach ihrem zweiten Bericht zum Thema „Schutz der tropischen Wälder“ legt die Enquete-Kommission „Vorsorge zum Schutz der Erdatmosphäre“ dem Deutschen Bundestag ihren dritten und damit für diese Wahlperiode letzten Bericht vor.

Der Bericht zum Thema „Schutz der Erde“ enthält eine eingehende aktuelle Bestandsaufnahme über den Treibhauseffekt und die weltweit zu erwartenden Klimaänderungen sowie den Ozonabbau in der Stratosphäre und befaßt sich schwerpunktmäßig mit Maßnahmen zur Reduktion energiebedingter klimarelevanter Spurengase auf nationaler und internationaler Ebene. Auf nationaler Ebene beziehen sich die entwickelten Zielvorgaben auf das vereinte Deutschland. Auf internationaler Ebene enthält der Bericht den Entwurf einer Internationalen Konvention über Klima und Energie und entwickelt eine Gesamtstrategie zum Schutz der Erdatmosphäre.

Die Bestandsaufnahme zeigt eindringlich, wie stark die gesamte Erdatmosphäre und damit die Erde selbst durch den zusätzlichen Treibhauseffekt und den Ozonabbau in der Stratosphäre gefährdet sind. Aus der Bedrohlichkeit der Situation ergeben sich weitreichende Zielvorstellungen, um der erwarteten Entwicklung wirksam entgegensteuern zu können.

Der Bericht macht deutlich, daß gewaltige Anstrengungen notwendig sind, um sachgerechte Strategien umzusetzen.

Die von der Enquete-Kommission für die nationale Ebene entwickelte Zielvorgabe einer dreißigprozentigen Reduktion der Kohlendioxidemissionen bis zum Jahr 2005 erfordert weitreichende und schnelle Beschlüsse von Parlament und Exekutive. Notwendig sind allerdings nicht nur Beschlüsse staatlicher Entscheidungsträger, sondern auch die aktive Unterstützung und Mithilfe der Bevölkerung. Dies setzt Sensibilisierung und Bewußtsein in bezug auf die Problemlage voraus. Die öffentliche Diskussion zu dieser Problematik ist in den Medien und der Öffentlichkeit während der vergangenen zwei Jahre erheblich intensiviert worden. Darüber hinaus ist es notwendig, daß die Zusammenhänge zwischen den Ursachen der Bedrohung der Erde und dem daraus resultierenden Handlungsbedarf für Politik, Wirtschaft und Gesellschaft auch im Rahmen der Bildung und Ausbildung vermittelt werden. Von daher begrüße ich es, daß der Bundesminister für Bildung und Wissenschaft meine Anregung aufgegriffen hat, Vorschläge zur Umsetzung der Empfehlungen der Enquete-Kommission in das Bildungssystem zu erarbeiten und entsprechende Empfehlungen einer Expertenkommission zeitgleich mit der Fertigstellung des dritten Berichtes der Enquete-Kommission vorgelegt werden konnten.

Auf internationaler Ebene bedeuten die Vorschläge der Enquete-Kommission – Reduktion der Kohlendioxidemissionen um 20 bis 25 Prozent auf EG-Ebene und um 30 Prozent in allen wirtschaftsstarken Industrieländern sowie um 20 Prozent im Durchschnitt der Industrieländer jeweils bis zum Jahr 2005 – einschneidende Eingriffe in die nationalen und internationalen Energiepolitiken. Hier gilt es, die übrigen betroffenen Länder von der Notwendigkeit derart weitreichender Zielvorgaben zu überzeugen und möglichst schnell zu entsprechenden internationalen Vereinbarungen zu gelangen, um eine international abgestimmte, gleichgerichtete Vorgehensweise in die Wege zu leiten. Die Enquete-Kommission sieht es als dringend notwendig an, daß im Rahmen der UN-Konferenz über Umwelt und Entwicklung 1992 in Brasilien zwei sektorbezogene Schutzkonventionen verabschiedet werden, von denen die eine die klimarelevanten Emissionen aus dem Energiebereich reduzieren, die andere der Vernichtung der tropischen Wälder entgegenwirken soll. Da die Zeitvorgaben für derart weitreichende und tiefgreifende internationale Vereinbarungen sehr kurz sind, hat die Enquete-Kommission zur Verstärkung der internationalen Diskussion einen Entwurf für eine Internationale Konvention über Klima und Energie erarbeitet. Hinsichtlich der angestrebten Internationalen Konvention

zum Schutz der tropischen Wälder enthält der zweite Bericht der Kommission detaillierte Angaben über politische Maßnahmen.

In den kommenden Monaten gilt es, die Empfehlungen der Enquete-Kommission in die nationale und internationale Diskussion einzuführen und auf ihrer Grundlage möglichst schnell zu weitreichenden Beschlüssen zu gelangen. Dies gilt insbesondere in bezug auf den kommenden EG-Gipfel und die zweite Weltklimakonferenz in Genf.

Ich hoffe, daß sich die Bundesregierung die Empfehlungen der Kommission – unabhängig davon, ob diese noch in der laufenden Wahlperiode im Deutschen Bundestag beraten werden können – zu eigen macht, auf nationaler Ebene entsprechende Maßnahmen einleitet und auf internationaler Ebene die Vorschläge der Kommission aufgreift und vertritt. Notwendig ist es außerdem, daß auch auf der Ebene der Bundesländer entsprechende Initiativen ergriffen werden.

Die Kommission hat während dieser Wahlperiode ein gewaltiges Arbeitspensum geleistet. Die vorliegenden Berichte wurden in knapp 120 Arbeitssitzungen, davon 2 Klausurwochen, erstellt. Fünfzehn – meist zweitägige – Anhörungen mit einer Vielzahl namhafter nationaler und internationaler Sachverständiger wurden durchgeführt. Innerhalb von einem Jahr wurde ein Studienprogramm zum Thema „Energie und Klima“ initiiert, abgewickelt und beraten, das – unter Beteiligung 50 wissenschaftlicher Institute – 150 Einzelstudien umfaßt und ein Gesamtvolumen von etwa 10 000 Seiten hat. Neben den Sitzungen fand eine Fülle von Fachgesprächen mit Experten aus allen betroffenen Bereichen statt. Im Rahmen mehrerer Delegationsreisen wurde mit einer Vielzahl ausländischer Partner über die Problematik diskutiert. Die Kommissionsmitglieder haben sich auf zahlreichen internationalen Fachtagungen über den aktuellen Stand der Diskussion informiert. Gespräche mit dem Bundeskanzler, allen zuständigen Bundesministern, den Fraktionsvorsitzenden und -vorständen der Bundestagsfraktionen haben einen intensiven Meinungsaustausch mit den Entscheidungsträgern auf politischer Ebene zur Gesamtproblematik ermöglicht. Die Kommissionsmitglieder haben auf einer großen Zahl von öffentlichen Veranstaltungen zur Thematik des Schutzes der Erdatmosphäre und den Ergebnissen der Kommissionsarbeit Stellung genommen und sich über die Medien intensiv an der öffentlichen Diskussion beteiligt. Den Ergebnissen der Kommissionsarbeit ist im Rahmen der Beratungen des Deutschen Bundestages jeweils zugestimmt worden. Eine Reihe von Beschlüssen auf EG-, Bundes- und Landesebene – in Parlamenten und in der Exekutive – haben die Empfehlungen der Kommission aufgegriffen. Entsprechende weitere Beschlußfassungen sind zu erwarten.

Über das bisher Geleistete hinaus ist es notwendig, daß eine Enquete-Kommission zum Schutz der Erdatmosphäre die bisherige Arbeit weiter vertieft und noch nicht abgeschlossene Themenfelder weiter aufgearbeitet werden. Gleichzeitig gilt es, die sich für die nationale Strategie ergebenden Fragen für das vereinte Deutschland im einzelnen zu untersuchen und aufzuarbeiten.

Von daher sieht es die Kommission als dringend notwendig an, daß ihre Arbeit in der nächsten Wahlperiode fortgesetzt wird.

Bis dahin muß die Diskussion im Parlament, in der Exekutive und in der Öffentlichkeit fortgesetzt werden. Die Kommission hat sich daher entschlossen, neben den einvernehmlich getragenen Darstellungen und Maßnahmenkonzepten insbesondere im Energiebereich auch teilweise noch kontroverse Wertungen darzustellen und den einzelnen Mitgliedern und Gruppen von Mitgliedern Gelegenheit zu geben, zu erläutern, wie sie sich eine weitere Konkretisierung der einvernehmlich getragenen Maßnahmenkonzepte im einzelnen vorstellen. Dieser „Einblick in die Werkstatt“ sollte allerdings nicht den Blick für die breite Übereinstimmung innerhalb der Gesamtproblematik verdecken, sondern nur entsprechend dem Stellenwert der damit verbundenen Fragestellungen in der nächsten Zeit zu einer konstruktiven Weiterentwicklung der Diskussion in diesen Bereichen beitragen helfen.

Wie bereits zu den beiden ersten Berichten, bitte ich alle, die diesen Bericht lesen, um Anregungen, Hinweise und konstruktive Kritik.

Mein herzlicher Dank gilt auch diesmal der Präsidentin des Deutschen Bundestages für die wohlwollende Unterstützung, die sie der Kommission gewährt hat. Mein Dank gilt allen Kommissionsmitgliedern für die intensive Kooperation. Mein Dank

gilt auch allen externen Sachverständigen für ihre Beiträge und die Unterstützung im Verlauf der Beratungen, ferner allen Studiennehmern und insbesondere den Projektleitern des Studienprogramms für ihren weit über die vertraglichen Verpflichtungen hinausgehenden Einsatz und ihre intensive Beteiligung an schwierigen Beratungsprozessen. Meinen besonderen, persönlichen Dank und den Dank der Kommission möchte ich dem Sekretariat für seinen beispiellosen und vorbildlichen Einsatz sowie die ausgezeichnete und vertrauensvolle Zusammenarbeit aussprechen. Ohne dieses – während der gesamten Kommissionstätigkeit unermüdliche – Engagement und die Bereitschaft zu durchgehend bedingungslosem Einsatz wäre eine solche intensive Kommissionsarbeit und die Vorlage dieses Berichtes nicht möglich gewesen. Darüber hinaus danke ich denjenigen Stellen in der Verwaltung, die in besonderem Maße die Kommission bei ihrer Arbeit unterstützt haben.

Bonn, den 1. Oktober 1990



Bernd Schmidbauer, MdB  
Vorsitzender der Enquete-Kommission  
„Vorsorge zum Schutz der Erdatmosphäre“

## Inhaltsübersicht

	Seite
<b>ABSCHNITT A</b>	
<b>Zusammenfassung –</b>	
<b>Problemdarstellung, Arbeit der Kommission und Handlungsempfehlungen im Überblick</b> .....	27
1. Kapitel Problemdarstellung im Überblick .....	27
2. Kapitel Bisherige Arbeit der Enquete-Kommission im Überblick .....	43
3. Kapitel Internationale und EG-weite Handlungsempfehlungen zur Eindämmung des zusätzlichen Treibhauseffektes und zum Schutz der Erdatmosphäre .....	46
4. Kapitel Nationale Handlungsempfehlungen zur Reduktion der Emissionen energiebedingter klimarelevanter Spurengase .....	59
5. Kapitel Empfehlungen zur Fortführung der Arbeit der Enquete-Kommission in der nächsten Wahlperiode .....	76
<b>ABSCHNITT B</b>	
<b>Aufgabenstellung und bisherige Arbeit der Kommission</b> .....	78
1. Kapitel Einführung, Problembeschreibung, Entstehung und bisherige Arbeit der Kommission .....	78
2. Kapitel Zusammensetzung der Kommission .....	81
3. Kapitel Bisherige Arbeit der Kommission .....	82
<b>ABSCHNITT C</b>	
<b>Treibhauseffekt und Klimaänderungen</b> .....	88
1. Kapitel Darstellung des aktuellen Kenntnisstandes .....	89
2. Kapitel Klimamodelle und Gütetest .....	145
3. Kapitel Mögliche Auswirkungen des berechneten Temperaturanstiegs .....	155
4. Kapitel Die Wirksamkeit der von der Enquete-Kommission empfohlenen Maßnahmen .....	199
5. Kapitel Klimaforschung und Forschungsbedarf .....	251
<b>ABSCHNITT D</b>	
<b>Ozonabbau in der Stratosphäre</b> .....	255
1. Kapitel Aktueller naturwissenschaftlicher Kenntnisstand .....	255

	Seite
2. Kapitel Fluorchlorkohlenwasserstoffe (FCKW), Halone, Chlorkohlenwasserstoffe (CKW) und Ersatzstoffe .....	284
3. Kapitel Modellabschätzungen zum Ausmaß zukünftiger Veränderungen .....	317
4. Kapitel Ozonzerstörung, Veränderungen der UV-B-Strahlung und deren Auswirkungen .....	335
5. Kapitel Maßnahmen zur FCKW- und Halonreduzierung .....	361
6. Kapitel Wissenschaftliche Untersuchungsprogramme und Forschungsbedarf .....	385
<i>Zusatzvotum der Kommissionsmitglieder Dr. Knabe, Frau Prof. Ganseforth, Frau Dr. Hartenstein, Dr. Kübler, Müller (Düsseldorf), Prof. Dr. Hennicke zu Abschnitt D, 5. Kapitel: „Maßnahmen zur FCKW- und Halonreduzierung“</i> .	391
 <b>ABSCHNITT E</b>	
<b>Nationales Vorgehen zur Reduktion der Emissionen energiebedingter klimarelevanter Spurengase</b> .....	392
1. Kapitel Ergebnisse, Handlungsempfehlungen und Forschungsbedarf .....	392
2. Kapitel Energie und Klima – Einführung, Studienprogramm der Enquete-Kommission sowie energiewirtschaftliche Begriffe, Energieeinheiten und Umrechnungsfaktoren .....	444
3. Kapitel Die Rolle der Energieversorgung an den Emissionen klimarelevanter Schadstoffe .....	458
4. Kapitel Potentiale einzelner Emissionsminderungsmaßnahmen bis zum Jahr 2005 und Ausblick auf 2050 .....	464
<i>Zusatzvotum der Kommissionsmitglieder Dr. Lippold (Offenbach), Fellner, Seesing, Frau Dr. Segall, Prof. Dr. Dr. Dolzer, Prof. Dr. Michaelis, Prof. Dr. Schikarski zu Abschnitt E, 4. Kapitel, Nr. 5.3: „Bewertung der Möglichkeiten zur Verminderung der CO<sub>2</sub>-Emissionen durch Atomkernenergie von Prof. Dr. Meyer-Abich und Prof. Dr. Heinloth“</i> .....	555
<i>Zusatzvotum der Kommissionsmitglieder Müller (Düsseldorf), Prof. Dr. Bach, Frau Prof. Ganseforth, Frau Dr. Hartenstein, Dr. Kübler zu Abschnitt E, 4. Kapitel, Nr. 5: Zusammenfassung und Bewertung der Ergebnisse des Studienkomplexes „Nutzung der Kernenergie“</i> .....	557
<i>Zusatzvotum des Kommissionsmitgliedes Dr. Knabe zu Abschnitt E, 4. Kapitel, Nr. 5.3: „Bewertung der Möglichkeiten zur Verminderung der CO<sub>2</sub>-Emissionen durch Atomkernenergie von Prof. Dr. Meyer-Abich und Prof. Dr. Heinloth“</i> .....	560
<i>Zusatzvotum der Kommissionsmitglieder Prof. Dr. Bach und Prof. Dr. Hennicke zu Abschnitt E, 4. Kapitel, Nr. 5.3: „Bewertung der Möglichkeiten zur Verminderung der CO<sub>2</sub>-Emissionen durch Atomkernenergie von Prof. Dr. Meyer-Abich und Prof. Dr. Heinloth“</i> .....	563
5. Kapitel Wege zu einer klimaverträglichen Energieversorgung – Strategien zu einer Vermeidung energiebedingter klimarelevanter Spurengasemissionen .....	584
<i>Zusatzvotum der Kommissionsmitglieder Dr. Lippold (Offenbach), Fellner, Frau Dr. Segall, Prof. Dr. Dr. Dolzer, Prof. Dr. Heinloth, Prof. Dr. Michaelis, Prof. Dr. Schikarski zu Abschnitt E, 5. Kapitel, Nr. 1.3.4.2: „Ausführungen des Öko-Instituts Freiburg zum Kernenergieausstieg 1995“</i> .....	620

	Seite
6. Kapitel	
Überblick über das Studienprogramm der Enquete-Kommission . . . . .	642
<i>Erklärung des Kommissionsvorsitzenden zu den Stellungnahmen und Voten zu Abschnitt E . . . . .</i>	<i>658</i>
<i>Zusatzvotum der Kommissionsmitglieder Schmidbauer, Dr. Lippold (Offenbach), Frau Schmidt (Spiesen), Frau Dr. Segall, Fellner, Seesing, Prof. Dr. Dolzer, Prof. Dr. Heinloth, Prof. Dr. Michaelis, Prof. Dr. Schikarski, Prof. Dr. Seiler, Prof. Dr. Zellner zu Abschnitt E: „Nationales Vorgehen zur Reduktion energiebedingter klimarelevanter Spurengase“ . . . . .</i>	<i>658</i>
<i>Energie- und umweltpolitisches Programm einer Vorsorge gegen Klimaschäden in einem vereinten Deutschland . . . . .</i>	<i>660</i>
1. Zusammenfassung der Erkenntnisse und Ergebnisse . . . . .	660
2. Kritische Analyse der Ergebnisse des Studienprogramms . . . . .	663
3. Ausdehnung auf das Gebiet der DDR – Politik zum Schutz der Erdatmosphäre in einem vereinten Deutschland . . . . .	678
4. Rahmenbedingungen und grundlegende Optionen . . . . .	696
5. Handlungsempfehlungen . . . . .	714
<i>Zusatzvotum der Kommissionsmitglieder Prof. Dr. Hennicke und Müller (Düsseldorf) sowie Prof. Dr. Bach, Frau Prof. Ganseforth, Prof. Dr. Graßl, Prof. Dr. Meyer-Abich, Frau Dr. Hartenstein, Dr. Knabe, Dr. Kübler zu Abschnitt E: „Nationales Vorgehen zur Reduktion energiebedingter klimarelevanter Spurengase“ . . . . .</i>	<i>728</i>
I. Einleitung/Gesamtwürdigung . . . . .	728
II. Ausgewählte Kritikpunkte . . . . .	731
III. Klimaschutz und Verkehrspolitik . . . . .	748
<i>Zusatzvotum des Kommissionsmitgliedes Dr. Knabe zu Abschnitt E: „Nationales Vorgehen zur Reduktion energiebedingter klimarelevanter Spurengase“ . . . . .</i>	<i>750</i>
I. Schaffung förderlicher rechtlicher Rahmenbedingungen . . . . .	751
II. Verringerung der Emission klimawirksamer Schadstoffe durch energiepolitische Maßnahmen . . . . .	752
III. Verringerung der Emission klimawirksamer Schadstoffe durch verkehrspolitische Maßnahmen . . . . .	753
IV. Verbot von Fluor-Chlor-Kohlenwasserstoffen, anderen ozonschädigenden Substanzen und Fluorkohlenwasserstoffen . . . . .	754
V. Klimaschutz durch Maßnahmen in Land- und Forstwirtschaft . . . . .	755
VI. Schutz der tropischen Wälder und ihrer Klimafunktionen . . . . .	756
VII. Internationale Zusammenarbeit und Koordinierung der Maßnahmen zum Schutz von Klima und Erdatmosphäre . . . . .	756
VIII. Abrüstung und Schutz der Erdatmosphäre . . . . .	757
<i>Zusatzvotum der Kommissionsmitglieder Prof. Dr. Hennicke und Prof. Dr. Bach zu Abschnitt E: „Nationales Vorgehen zur Reduktion energiebedingter klimarelevanter Spurengase“ . . . . .</i>	<i>757</i>
Weitergehende Maßnahmen im Bereich Energie und FCKW . . . . .	757
I. Der ökologische „Umbau“ des Energiesektors . . . . .	757
II. Zielstruktur einer sozial-, umwelt und klimaverträglichen Neuordnung der Energiewirtschaft . . . . .	759
III. Kriterien und inhaltliche Eckpunkte eines „Energiespargesetzes“ . . . . .	759
<i>Stellungnahme der Kommissionsmitglieder Müller (Düsseldorf), Frau Prof. Ganseforth, Frau Dr. Hartenstein und Dr. Kübler zu den Zusatzvoten des Kommissionsmitgliedes Dr. Knabe und der Kommissionsmitglieder Prof. Dr. Bach und Prof. Dr. Hennicke zu Abschnitt E: „Nationales Vorgehen zur Reduktion energiebedingter klimarelevanter Spurengase“ . . . . .</i>	<i>765</i>



	Seite
<i>Ergänzendes Votum der Kommissionsmitglieder Prof. Dr. Hennicke und Müller (Düsseldorf), Prof. Dr. Bach, Frau Prof. Ganseforth, Frau Dr. Hartenstein, Dr. Knabe, Dr. Kübler zur Energiewirtschaft in der DDR</i> .....	766
I. <i>Vorbemerkung</i> .....	766
II. <i>Zur Situation der Energieversorgung und Umweltbelastung in der DDR</i> .....	768
III. <i>Einschätzung und Beurteilung der geplanten energiewirtschaftlichen Projekte und Kooperation</i> .....	791
IV. <i>Ausgangspunkte für eine Kooperation zur Umsetzung der Energiewende</i> .....	792
V. <i>Nachbemerkung</i> .....	814
 <b>ABSCHNITT F</b>	
<b>Internationale Strategie zur Reduktion energiebedingter klimarelevanter Spurengasemissionen</b> .....	815
1. Kapitel	
Bisherige internationale und EG-weite Aktivitäten zur Eindämmung des zusätzlichen Treibhauseffektes .....	821
2. Kapitel	
Empfehlungen zur Ausgestaltung einer Internationalen Konvention über Klima und Energie und möglicher Zusatzvereinbarungen .....	842
3. Kapitel	
Empfehlungen zur Implementation des Übereinkommens und der Protokolle .....	864
<i>Zusatzvotum der Kommissionsmitglieder Müller (Düsseldorf), Prof. Dr. Bach, Prof. Dr. Dr. Crutzen, Frau Prof. Ganseforth, Prof. Dr. Graßl, Frau Dr. Hartenstein, Prof. Dr. Hennicke, Dr. Kübler, Prof. Dr. Meyer-Abich, Dr. Knabe zu Abschnitt F: „Internationale Strategie zur Reduktion energiebedingter klimarelevanter Spurengasemissionen“</i> .....	866
 <b>ABSCHNITT G</b>	
<b>Gesamtstrategie zum Schutz der Erdatmosphäre</b> .....	869
1. Kapitel	
Politische Maßnahmen .....	870
2. Kapitel	
Forschungsempfehlungen .....	879
 <b>ANHANG</b> .....	 883
1. Gesamtliteraturverzeichnis .....	883
2. Begriffserläuterungen .....	904
3. Abkürzungsverzeichnis .....	922
4. Chemische Formeln .....	925
5. Vorsätze- und Vorsatzzeichen-Erklärungen .....	925
6. Verzeichnis der Kommissionsdrucksachen .....	926

## Inhaltsverzeichnis

	Seite		Seite
<b>ABSCHNITT A</b>			
<b>Zusammenfassung – Problemendarstellung, bisherige Arbeit der Kommission und Handlungsempfehlungen im Überblick</b> .....	27	3. Empfehlungen zum Schutz der tropischen Wälder .....	57
<b>1. Kapitel</b>		4. Handlungsbedarf im Bereich Landwirtschaft und Welternährung .....	59
<b>Problemendarstellung im Überblick</b> .....	27	5. Integration der bereits bestehenden und noch zu schaffenden sektoralen internationalen Vereinbarungen zu einem Gesamtkonzept zum Schutz der Erdatmosphäre im Jahr 1998 .....	59
1. Zusätzlicher Treibhauseffekt und weltweite Klimaänderungen .....	27	6. Schaffung eines Umweltrates .....	59
2. Klima und Energie – Emissionen energiebedingter klimarelevanter Spurengase .....	33	<b>4. Kapitel</b>	
3. FCKW und andere Verbindungen, die sowohl den Ozonabbau in der Stratosphäre bewirken als auch zum zusätzlichen Treibhauseffekt beitragen .....	39	<b>Nationale Handlungsempfehlungen zur Reduktion der Emissionen energiebedingter klimarelevanter Spurengase</b> .....	59
4. Vernichtung der tropischen Wälder ..	43	1. Reduktionsziele für die energiebedingten klimarelevanten Spurengasemissionen .....	60
<b>2. Kapitel</b>		2. Zentrale Ergebnisse des Studienprogramms der Kommission zur Erreichung der Reduktionsziele .....	62
<b>Bisherige Arbeit der Enquete-Kommission im Überblick</b> .....	43	3. Strategie zur Erfüllung der Reduktionsziele .....	66
1. Erster Bericht .....	45	4. Grundsätze und Prioritäten bei den Maßnahmen bezüglich der Energieträgerstruktur .....	67
2. Zweiter Bericht .....	45	4.1 Energieeinsparung, verbesserte Energieeffizienz, rationellere Energieverwendung .....	67
3. Dritter Bericht .....	45	4.2 Erneuerbare Energien .....	69
<b>3. Kapitel</b>		4.3 Fossile Energieträger .....	70
<b>Internationale und EG-weite Handlungsempfehlungen zur Eindämmung des zusätzlichen Treibhauseffektes und zum Schutz der Erdatmosphäre</b> .....	46	4.4 Kernenergie .....	70
1. Empfehlungen zur Reduktion der FCKW und anderer Verbindungen, die sowohl den Abbau der Ozonschicht der Stratosphäre bewirken als auch zum zusätzlichen Treibhauseffekt beitragen .....	46	5. Sektorspezifische Maßnahmen und Programme .....	72
1.1 Internationale Maßnahmen .....	46	5.1 Heizwärmebereich in allen Sektoren ..	72
1.2 Maßnahmen innerhalb der Europäischen Gemeinschaften .....	47	5.2 Verkehrssektor .....	73
2. Empfehlungen zur Reduktion der Emissionen klimarelevanter Spurengase aus dem Energiebereich einschließlich dem Verkehrsbereich, insbesondere des Kohlendioxids, des Methans, der Stickoxide, des Kohlenmonoxids und der flüchtigen organischen Verbindungen (ohne Methan) .....	50	5.3 Industrie und Kleinverbrauch .....	75
2.1 Internationale Maßnahmen – Reduktionsziele und Internationale Konvention über Klima und Energie .....	50	5.4 Energieumwandlungssektor .....	75
2.1.1 Reduktionsziele .....	50	<b>5. Kapitel</b>	
2.1.2 Internationale Konvention über Klima und Energie und dazugehörige Protokolle .....	53	<b>Empfehlungen zur Fortführung der Arbeit der Enquete-Kommission in der nächsten Wahlperiode</b> .....	76
2.2 Maßnahmen im Rahmen der Europäischen Gemeinschaften .....	55	<b>6. Tabellenverzeichnis</b> .....	76
		<b>7. Abbildungsverzeichnis</b> .....	77
		<b>ABSCHNITT B</b>	
		<b>Aufgabenstellung und bisherige Arbeit der Kommission</b> .....	78
		<b>1. Kapitel</b>	
		<b>Einführung, Problembeschreibung, Entstehung und bisherige Arbeit der Kommission</b> ..	78

	Seite		Seite	
<b>2. Kapitel</b>		3.	Strahlungshaushalt und seine Beeinflussung durch den Menschen . . . . .	127
<b>Zusammensetzung der Kommission</b> . . . . .	81	3.1	Der Strahlungshaushalt des Systems Erde-Atmosphäre . . . . .	127
1. Mitglieder der Kommission . . . . .	81	3.2	Der Treibhauseffekt . . . . .	129
2. Mitglieder des Kommissionssekretariats . . . . .	81	3.2.1	Strahlungs- und Energiebilanz . . . . .	129
<b>3. Kapitel</b>		3.2.2	Absorption der Treibhausgase . . . . .	131
<b>Bisherige Arbeit der Kommission</b> . . . . .	82	3.2.3	Anteil der einzelnen Gase am Treibhauseffekt . . . . .	132
<b>4. Literaturverzeichnis</b> . . . . .	87	3.3	Ursachen für die Änderung des Strahlungshaushaltes . . . . .	134
<b>ABSCHNITT C</b>		3.3.1	Treibhausgase und indirekt klimawirksame Gase . . . . .	134
<b>Treibhauseffekt und Klimaänderung</b> . . . . .	88	3.3.2	Aerosolteilchen . . . . .	134
<b>Einführung</b> . . . . .	88	3.3.3	Wolken . . . . .	135
<b>1. Kapitel</b>		3.3.4	Andere Parameter . . . . .	136
<b>Darstellung des aktuellen Kenntnisstandes</b> . . . . .	89	4.	Literaturverzeichnis . . . . .	136
1. Allgemeine Angaben zur Erdatmosphäre . . . . .	89	5.	Abbildungsverzeichnis . . . . .	144
1.1 Klima und Atmosphäre . . . . .	89	6.	Tabellenverzeichnis . . . . .	144
1.2 Dynamik und Struktur der Atmosphäre . . . . .	90	<b>2. Kapitel</b>		
1.3 Chemische Zusammensetzung der Atmosphäre . . . . .	91	<b>Klimamodelle und Gütetest</b> . . . . .	145	
1.4 Kreisläufe klimarelevanter Spurengase in der Atmosphäre . . . . .	93	1.	Modelle des Kohlenstoffkreislaufes . . . . .	145
1.4.1 Wasserdampf . . . . .	93	1.1	Kohlenstoff im Ozean . . . . .	145
1.4.2 Kohlendioxid . . . . .	96	1.2	Kohlenstoff in der Land-Biosphäre . . . . .	146
1.4.3 Methan . . . . .	99	1.3	Simulation des Kohlenstoffkreislaufes mit gekoppelten Modellen . . . . .	147
1.4.4 Distickstoffoxid . . . . .	101	2.	Vereinfachte Klimamodelle . . . . .	147
1.4.5 Halogenierte Kohlenwasserstoffe . . . . .	103	2.1	Energiebilanzmodelle . . . . .	147
1.4.6 Ozon in der Troposphäre . . . . .	104	2.2	Strahlungs-Konvektionsmodelle . . . . .	148
1.4.7 Indirekt klimawirksame Gase . . . . .	106	3.	Gekoppelte Chemie-Klima-Modelle . . . . .	149
– Kohlenmonoxid . . . . .	106	4.	Komplexe Klimamodelle . . . . .	150
– Stickoxide . . . . .	107	4.1	Modelle der allgemeinen Zirkulation der Atmosphäre . . . . .	150
– Flüchtige organische Verbindungen . . . . .	108	4.2	Modelle der Zirkulation des Ozeans . . . . .	150
2. Änderung von Klimaparametern in der jüngsten Vergangenheit . . . . .	110	4.3	Gekoppelte Ozean-Atmosphäre-Modelle . . . . .	151
2.1 Langzeittrends klimarelevanter Spurengase und ihre Ursachen . . . . .	110	4.4	Gütetest globaler Zirkulationsmodelle . . . . .	151
2.1.1 Wasserdampf . . . . .	110	4.5	Gleichgewichtsrechnungen . . . . .	152
2.1.2 Kohlendioxid . . . . .	112	4.6	Zeitabhängige Rechnungen . . . . .	152
2.1.3 Methan . . . . .	113	5.	Literaturverzeichnis . . . . .	153
2.1.4 Distickstoffoxid . . . . .	115	<b>3. Kapitel</b>		
2.1.5 Halogenierte Kohlenwasserstoffe . . . . .	115	<b>Mögliche Auswirkungen des berechneten Temperaturanstiegs</b> . . . . .	155	
2.1.6 Ozon in der Troposphäre . . . . .	116	Einführung . . . . .	155	
2.1.7 Indirekt klimawirksame Spurengase . . . . .	116	1.	Berechnete globale Klimaänderungen . . . . .	156
– Kohlenmonoxid . . . . .	116	1.1	Temperaturänderungen . . . . .	157
– Stickoxide . . . . .	118	1.2	Niederschlagsänderungen . . . . .	159
– Flüchtige organische Verbindungen . . . . .	118	1.3	Meeresspiegelanstieg . . . . .	159
2.2 Änderungen von Klimaparametern . . . . .	118	1.4	Weitere globale Änderungen . . . . .	161
2.2.1 Temperatur . . . . .	118	1.5	Veränderte Extremwertstatistik . . . . .	161
2.2.2 Niederschlagstätigkeit . . . . .	122	2.	Berechnete regionale und jahreszeitliche Klimaänderungen . . . . .	163
2.2.3 Meeresspiegel . . . . .	123	2.1	Temperaturänderungen . . . . .	164
2.2.4 Atmosphärische Zirkulation . . . . .	126	2.2	Niederschlagsänderungen . . . . .	166
2.2.5 Extreme Wetterereignisse . . . . .	126	2.3	Änderung der Meereisausdehnung . . . . .	167
		2.4	Schwund des Permafrostes . . . . .	167

	Seite		Seite
2.5	168	1.2.3	205
2.5.1	168	1.2.4	205
2.5.2	168	1.3	206
3.	169	– Szenario „business as usual“ (BAU)	207
3.1	169	– Szenario Br	207
3.1.1	169	– Szenario Cr	207
3.1.2	172	– Szenario Dr	207
3.1.3	172	– Szenario Er	207
3.1.4	173	1.4	208
3.2	174	– Szenario MD	208
3.3	174	– Szenario LD	208
3.3.1	175	– Szenario LW	209
3.3.2	175	– Szenario EK	209
3.3.3	178	– Szenario EKC	209
3.4	178	– Szenario LWC	209
3.5	180	2.	209
3.5.1	181	2.1	209
3.5.2	181	2.1.1	209
3.5.3	182	2.1.2	211
3.5.4	182	2.1.3	211
3.5.5	182	2.1.4	211
3.5.6	183	2.1.5	211
3.6	185	2.1.6	212
3.7	186	2.1.7	213
3.7.1	186	– Konzentration	213
3.7.2	187	– Temperatur	214
3.7.3	187	2.2	214
3.7.4	188	Das dreidimensionale gekoppelte Ozean-Atmosphäre Modell	214
3.7.5	188	2.2.1	214
3.8	189	Atmosphärisches Zirkulationsmodell (ECHAM)	214
3.9	190	2.2.2	215
3.10	192	Das erste ozeanisches Zirkulationsmodell (LSG)	215
3.11	193	2.2.3	216
3.12	194	Das zweite ozeanisches Zirkulationsmodell (OPYC)	216
3.13	194	2.2.4	216
4.	195	Kopplungsmethode	216
5.	198	2.2.5	216
6.	198	Modellgütetest	216
<b>4. Kapitel</b>		2.3	220
<b>Die Wirksamkeit der von der Enquete-Kommission empfohlenen Maßnahmen</b>	199	2.3.1	220
1.	199	Vergleich von eindimensionalen Modellen untereinander	220
1.1	199	2.3.2	221
1.1.1	199	Vergleich von eindimensionalen und dreidimensionalen Modellen	221
1.1.2	201	3.	222
1.1.3	201	Ergebnisse aus eindimensionalen Szenarienrechnungen	222
1.1.4	203	3.1	222
1.2	203	Die Wirksamkeit der EK-Empfehlungen durch Reduktion der Emissionen von FCKW und H-FCKW	222
1.2.1	203	3.1.1	222
1.2.2	204	EK-Szenario London	222
		3.1.2	222
		EK-Szenario Washington	222
		3.1.3	222
		EK-Szenario Bonn	222
		3.1.4	224
		EK-Szenario Brasilia	224

	Seite		Seite
3.1.5	224	1.1.1	255
3.2	225	1.1.2	261
3.2.1	225	1.2	263
3.2.2	225	2.	268
3.2.3	228	2.1	268
3.2.4	229	2.2	270
3.3	230	2.2.1	270
3.3.1	230	2.2.2	271
3.3.2	230	2.3	271
3.4	232	2.3.1	271
3.5	233	2.3.2	272
3.6	234	2.4	273
3.7	235	2.4.1	273
3.8	236	2.4.2	273
– Ohne Maßnahmen	237	2.4.3	274
– Verschärfung des Montrealer Protokolls in der Fassung der 2. Vertragsstaatenkonferenz von London	237	3.	276
– Tropenwald-Rettungsplan	238	3.1	276
– Reduktionsziele für energiebedingte CO <sub>2</sub> -Emissionen	238	3.2	277
4.	239	4.	282
5.	240	5.	283
5.1	240	6.	283
5.2	242		
5.3	243	<b>2. Kapitel</b>	
6.	248	<b>Fluorchlorkohlenwasserstoffe (FCKW), Halone, Chlorkohlenwasserstoffe (CKW) und Ersatzstoffe</b>	284
7.	250	1.	284
8.	250	1.1	284
<b>5. Kapitel</b>		1.2	286
<b>Klimaforschung und Forschungsbedarf</b>	251	1.2.1	286
1.	251	– International	286
2.	252	– In der EG	286
		– Bundesrepublik Deutschland	286
<b>ABSCHNITT D</b>		1.2.2	290
<b>Ozonabbau in der Stratosphäre</b>	255	– International	290
		– In der EG	290
<b>Einführung</b>	255	– Bundesrepublik Deutschland	290
<b>1. Kapitel</b>		1.2.3	292
<b>Aktueller naturwissenschaftlicher Kenntnisstand</b>	255	– Bundesrepublik Deutschland	292
1.	255	2.	292
1.1	255	2.1	292
		2.2	294
		2.3	297
		3.	299
		3.1	299
		3.1.1	299
		3.1.2	299

	Seite		Seite	
		1.1	Ein-, zwei- und dreidimensionale (1-D-, 2-D- und 3-D-) Modelle . . . . .	317
		1.2	Beschreibung zweier Rechenmodelle . . . . .	321
3.1.3	Kunststoffverschäumung . . . . .	1.2.1	Das 1-D- und 1 1/2-D-Chemie-Klima- modell des Max-Planck-Instituts für Chemie (MPIC) . . . . .	321
	– Polyurethan (PUR)-Hartschaum . . . . .	1.2.2	Das Modell der Universität Oslo (UIO) . . . . .	322
	– PUR-Integralschaum . . . . .	1.3	Leistungsfähigkeit der Modelle sowie Genauigkeit der Vorhersagen . . . . .	322
	– Polystyrol-Hartschäume . . . . .	2.	Szenarien der Emissionen ozonrele- vanter Substanzen . . . . .	323
	– PUR-Weichschäume . . . . .	2.1	Entwicklung der FCKW- und Halon- emissionen . . . . .	323
3.1.4	Klima- und Kältetechnik . . . . .	2.2	Einfluß teilhalogenierter FCKW, des Methylchloroform (CH <sub>3</sub> CCl <sub>3</sub> ) und des Tetrachlorkohlenstoffs (CCl <sub>4</sub> ) . . . . .	324
	– Kälteanlagen zur gewerblichen Nutzung . . . . .	2.3	Andere ozon- und klimarelevante Gase . . . . .	325
	– Großkälteanlagen zur industriellen Nutzung . . . . .	2.4	Prognostizierte Erhöhung des Chlor- und Bromgehalts in der Stratosphäre . . . . .	325
	– Fahrzeugklimaanlagen und Trans- portkälteanlagen . . . . .	3.	Prognostizierte Veränderungen . . . . .	329
	– Gebäudeklimatisierung . . . . .	3.1	Abnahme des Gesamt ozonegehalts . . . . .	329
	– Haushaltskühlgeräte . . . . .	3.2	Änderung der Ozonverteilung und Temperaturverteilung . . . . .	330
3.1.5	Spraydosen . . . . .	3.3	Erhöhung der UV-B-Strahlung in Erd- bodennähe . . . . .	331
3.1.6	Sonstige Anwendungen . . . . .	4.	Literaturverzeichnis . . . . .	333
3.2	Halone . . . . .	5.	Tabellenverzeichnis . . . . .	335
3.2.1	Allgemeines . . . . .	6.	Abbildungsverzeichnis . . . . .	335
3.2.2	Feuerlöschung . . . . .			
3.3	Chlorkohlenwasserstoffe (CKW) . . . . .	<b>4. Kapitel</b>		
3.3.1	Methylchloroform (CH <sub>3</sub> CCl <sub>3</sub> ) . . . . .	<b>Ozonzerstörung, Veränderungen der UV-B- Strahlung und deren Auswirkungen</b> . . . . .	335	
3.3.2	Tetrachlorkohlenstoff (CCl <sub>4</sub> ) . . . . .	1.	Zusammenhang zwischen Ozonkon- zentration und UV-B-Strahlung . . . . .	335
4.	FCKW-Ersatzstoffe . . . . .	1.1	Natürliche Verteilung und Variation der UV-B-Strahlung . . . . .	336
4.1	Allgemeines . . . . .	1.2	Ozonabnahme und berechnete Ände- rungen der UV-B-Intensität . . . . .	339
4.2	Forschungsprogramme . . . . .	2.	Messungen der UV-B-Intensität . . . . .	340
4.3	Mechanismen und Folgeprodukte des chemischen Abbaus in der Atmo- sphäre . . . . .	2.1	Ergebnisse direkter Beobachtungen . . . . .	340
4.4	Anwendung möglicher Ersatzstoffe . . . . .	2.2	Ursachen potentieller Differenzen zwi- schen UV-B-Meßwerten und -Modell- ergebnissen . . . . .	341
4.4.1	Teilhalogenierte FCKW . . . . .	2.3	UV-B-Meßtechnik . . . . .	341
	– H-FCKW 22 . . . . .	2.3.1	Beschreibung und Bewertung der Meßverfahren und -geräte . . . . .	342
	– H-FCKW 123 . . . . .	2.3.2	Meßvorhaben und Meßstationen . . . . .	343
	– H-FCKW 141 b . . . . .	3.	Forschungs- und Entwicklungsbedarf . . . . .	344
	– H-FCKW 124 . . . . .	4.	Auswirkungen erhöhter UV-B-Strah- lung . . . . .	345
	– H-FCKW 142 b . . . . .	4.1	Die Wirkung von UV-Strahlung auf biologische Systeme . . . . .	345
	– H-FCKW 225 ca und 225 cb . . . . .	4.2	Gegenwärtige und zukünftige Verän- derungen der biologisch effektiven UV-Strahlung . . . . .	347
4.4.2	Fluorkohlenwasserstoffe (FKW) . . . . .	4.3	Direkte Auswirkungen auf den Men- schen . . . . .	348
	– FKW 134 a . . . . .	4.3.1	Augenerkrankungen . . . . .	349
	– FKW 143 a . . . . .	4.3.2	Immunsystem . . . . .	349
	– FKW 152 a . . . . .			
	– FKW 23 . . . . .			
	– FKW 125 . . . . .			
4.4.3	Perfluorierte Alkane . . . . .			
4.4.4	Halogenfreie Verbindungen . . . . .			
4.5	Hemmnisse der Markteinführung für Ersatzstoffe . . . . .			
4.5.1	Kosten . . . . .			
4.5.2	DIN . . . . .			
5.	Literaturverzeichnis . . . . .			
6.	Tabellenverzeichnis . . . . .			
7.	Abbildungsverzeichnis . . . . .			
<b>3. Kapitel</b>				
<b>Modellabschätzungen zum Ausmaß zukünftiger Veränderungen</b> . . . . .	317			
1.	Grundlagen . . . . .			

	Seite		Seite		
4.3.3	Haut .....	349	– Einschätzung der Ergebnisse der zweiten Vertragsstaatenkonferenz .....	370	
4.4	Auswirkungen auf terrestrische Ökosysteme .....	351	1.2	Internationale Konferenzen .....	371
4.4.1	Experimentelle Beobachtungen bei Landpflanzen .....	351	–	Konferenz über globale Erwärmung und Klimaänderungen in Neu Delhi .....	371
4.4.2	Schädigungsmechanismen .....	351	–	Internationale Konferenz zur Rettung der Ozonschicht in London ..	371
4.4.3	Schutzmechanismen .....	352	–	Internationale Umweltschutzkonferenz in Den Haag .....	372
4.4.4	Bodenmikroorganismen und Stickstoffversorgung .....	352	–	Wirtschaftsgipfel in Paris .....	372
4.4.5	Einfluß von UV-B-Strahlung in Kombination mit anderen Streßfaktoren ..	352	2.	Maßnahmen innerhalb der Europäischen Gemeinschaften .....	372
4.5	Auswirkungen auf marine Ökosysteme .....	353	2.1	Verordnung (EWG) Nr. 3322/88 des Rates über bestimmte Fluorchlorkohlenwasserstoffe und Halone, die zu einem Abbau der Ozonschicht führen ..	373
4.5.1	Phytoplankton .....	354	–	Ökologische Bedeutung .....	354
–	Ökologische Bedeutung .....	354	–	Schädigung .....	354
–	Schädigung .....	354	–	Gegenwärtige Situation .....	355
4.5.2	Konsumenten und Nahrungskette ..	355	2.2	EG-Umweltratssitzung (März 1989) ..	373
4.5.3	Globale Konsequenzen .....	355	2.3	Vorschlag einer Verordnung des Rates über Stoffe, die zu einem Abbau der Ozonschicht führen .....	373
4.6	Einfluß vermehrter UV-B-Strahlung auf die Chemie der Atmosphäre .....	356	3.	Maßnahmen in der Bundesrepublik Deutschland .....	373
5.	Rückkopplungen zwischen Ozonänderung, UV-B-Intensität und Temperatur .....	356	3.1	Empfehlungen der Enquete-Kommission (1988) .....	373
5.1	Rückkopplungen in der Troposphäre ..	357	3.1.1	Internationale Maßnahmen .....	374
5.2	Rückkopplungen in der Stratosphäre ..	358	3.1.2	Maßnahmen innerhalb der Europäischen Gemeinschaften .....	374
5.3	Rückkopplungen zwischen Troposphäre und Stratosphäre .....	358	3.1.3	Nationale Maßnahmen .....	374
6.	Literaturverzeichnis .....	358	3.2	Umsetzung der Empfehlungen .....	375
7.	Tabellenverzeichnis .....	360	3.2.1	Beschluß des Deutschen Bundestages vom 9. März 1989 .....	376
8.	Abbildungsverzeichnis .....	360	3.2.2	Selbstverpflichtungen der Industrie ..	376
			3.2.3	Verordnung zum Verbot von bestimmten, die Ozonschicht abbauenden Halogenkohlenwasserstoffen (FCKW-Halon-Verbotsverordnung) .....	377
			–	Liste der geregelten Stoffe .....	377
			–	Reduktionsquoten und Zeitpläne ..	377
			–	Aerosolbereich .....	377
			–	Kältemittel .....	378
			–	Schaumstoffe .....	378
			–	Reinigungs- und Lösemittel .....	378
			–	Löschmittel .....	378
			–	Betrieb, Instandhaltung, Außerbetriebnahme, Rücknahmeverpflichtung .....	378
			–	Kennzeichnung .....	379
			4.	Maßnahmen in anderen Ländern .....	379
			–	Australien .....	379
			–	Finnland .....	379
			–	Indien .....	379
			–	Kanada .....	379
			–	Neuseeland .....	380
			–	Niederlande .....	380
			–	Norwegen .....	380
			–	Österreich .....	380
			–	Schweden .....	380
			–	Schweiz .....	380
<b>5. Kapitel</b>					
<b>Maßnahmen zur FCKW- und Halonreduzierung .....</b>		<b>361</b>			
1.	Internationale Bemühungen .....	361			
1.1	Internationale Vereinbarungen .....	361			
1.1.1	Wiener Übereinkommen vom 22. März 1985 zum Schutz der Ozonschicht ..	361			
1.1.2	Montrealer Protokoll über Stoffe, die zu einem Abbau der Ozonschicht führen ..	363			
–	Verpflichtungen der Vertragsparteien .....	365			
–	Ausnahmeregelungen .....	365			
–	Einschätzung des Montrealer Protokolls .....	365			
1.1.3	Verschärfung des Montrealer Protokolls .....	366			
–	Erste Vertragsstaatenkonferenz zum Montrealer Protokoll in Helsinki .....	366			
–	UNEP-Konferenzen und Arbeitsgruppensitzungen .....	367			
–	Tagung des EG-Umweltministerats zur Überprüfung des Montrealer Protokolls .....	367			
–	Zweite Vertragsstaatenkonferenz zum Montrealer Protokoll in London .....	368			

	Seite		Seite
— USA .....	380	2. Nationale Handlungsempfehlungen zur Reduktion der Emissionen energiebedingter klimarelevanter Spurengase .....	427
— VR China .....	380	2.1 Reduktionsziele für die energiebedingten klimarelevanten Spurengasemissionen .....	428
5. Empfehlungen zum Schutz der Ozonschicht und zur Eindämmung des Treibhauseffektes .....	381	2.2 Strategie zum Erreichen der Reduktionsziele .....	430
5.1 Internationale Maßnahmen .....	381	2.3 Grundsätze und Prioritäten bei den Maßnahmen bezüglich der Energieträgerstruktur .....	431
5.2 Maßnahmen innerhalb der Europäischen Gemeinschaften .....	381	2.3.1 Energieeinsparung, verbesserte Energieeffizienz, rationellere Energieverwendung .....	431
6. Literaturverzeichnis .....	384	2.3.2 Erneuerbare Energien .....	432
7. Tabellenverzeichnis .....	384	2.3.3 Fossile Energieträger .....	433
8. Abbildungsverzeichnis .....	384	2.3.4 Kernenergie .....	434
<b>6. Kapitel</b>		2.4 Sektorspezifische Maßnahmen und Programme .....	435
<b>Wissenschaftliche Untersuchungsprogramme und Forschungsbedarf</b> .....	385	2.4.1 Heizwärmebereich in allen Sektoren .	435
1. Wissenschaftliche Untersuchungsprogramme .....	385	2.4.2 Verkehrssektor .....	436
1.1 Ozonforschungsprogramm des Bundesministers für Forschung und Technologie .....	385	2.4.3 Industrie und Kleinverbrauch .....	438
1.2 Stratosphärisches Ozonforschungsprogramm der EG/EFTA-Länder ....	388	2.4.4 Energiewandlungssektor .....	438
1.3 Planungen der amerikanischen Weltraumbehörde NASA .....	389	2.5 Empfehlungen zur Fortführung der Arbeit der Enquete-Kommission in der nächsten Wahlperiode .....	439
2. Forschungsbedarf .....	389	3. Forschungsbedarf .....	439
3. Förderschwerpunkt „Wirkungen von UV-B-Strahlung“ des Bundesministers für Forschung und Technologie .....	390	3.1 Kriterien zur Auswahl von Reduktionsstrategien .....	440
<i>Zusatzvotum der Kommissionsmitglieder Dr. Knabe, Frau Prof. Ganseforth, Frau Dr. Hartenstein, Dr. Kübler, Müller (Düsseldorf), Prof. Dr. Hennicke zu Abschnitt D, 5. Kapitel: „Maßnahmen zur FCKW- und Halonreduzierung“</i> .....	391	3.2 Verbesserung der Datenbasis und Energiesystemanalyse .....	440
<b>ABSCHNITT E</b>		3.3 Weiterentwicklung von Techniken und Verfahren sowie Erforschung von Markteinführungsstrategien .....	440
<b>Nationales Vorgehen zur Reduktion der Emissionen energiebedingter klimarelevanter Spurengase</b> .....	392	3.4 Ausgestaltung nationaler Maßnahmen	441
<b>1. Kapitel</b>		3.5 Ausgestaltung internationaler Maßnahmen .....	442
<b>Ergebnisse, Handlungsempfehlungen und Forschungsbedarf</b> .....	392	3.6 Reduktionsstrategien für die Bundesrepublik Deutschland nach dem Beitritt der DDR .....	442
1. Ergebnisse der Analysen zu den Minderungsmöglichkeiten der Emissionen energiebedingter klimarelevanter Spurengase bis zum Jahr 2005 .....	392	3.7 Europäisches Institut zur Behandlung globaler Umweltprobleme .....	442
Vorbemerkung .....	392	4. Tabellenverzeichnis .....	443
1.1 Problemstellung und Zielsetzung ....	392	5. Abbildungsverzeichnis .....	443
1.2 Ergebnisse der Abschätzung der Einsparpotentiale für die Referenz-Entwicklung und die Reduktionsszenarien bis zum Jahr 2005 .....	393	<b>2. Kapitel</b>	
1.2.1 Die Referenz-Entwicklung .....	394	<b>Energie und Klima – Einführung, Studienprogramm der Enquete-Kommission sowie energiewirtschaftliche Begriffe, Energieeinheiten und Umrechnungsfaktoren</b> .....	444
1.2.2 Reduktionsszenario „Energiepolitik“ .	395	1. Energie und Klima – Einführung ....	444
1.2.3 Reduktionsszenario „Ausstieg aus der Kernenergie“ .....	402	1.1 Zusätzlicher Treibhauseffekt und weltweite Klimaänderungen .....	444
1.2.4 Reduktionsszenario „Ausbau der Kernenergie“ .....	410	1.2 Energiebedingte klimarelevante Emissionen .....	446
1.3 Die Reduktionsszenarien im Vergleich .....	416	2. Studienprogramm der Enquete-Kommission – Einführung .....	450



	Seite		Seite		
3.	Energiewirtschaftliche Begriffe, Energieeinheiten und Umrechnungsfaktoren . . . . .	456	3.	Emissionsminderung durch erneuerbare Energiequellen . . . . .	489
4.	Tabellenverzeichnis . . . . .	457	3.1	Untersuchungsgegenstand . . . . .	489
5.	Abbildungsverzeichnis . . . . .	457	3.2	Stand der Technik und Kosten . . . . .	490
<b>3. Kapitel</b>			3.2.1	Photovoltaik . . . . .	490
<b>Die Rolle der Energieversorgung an den Emissionen klimarelevanter Schadstoffe . . . . .</b>		<b>458</b>	3.2.2	Windenergie . . . . .	491
1.	Die weltweite Situation . . . . .	458	3.2.3	Wasserkraft . . . . .	492
2.	Die Situation in der Bundesrepublik Deutschland (ohne ehemalige DDR) . .	460	3.2.4	Biomasse . . . . .	493
3.	Tabellenverzeichnis . . . . .	464	3.2.5	Nachwachsende Rohstoffe . . . . .	494
4.	Abbildungsverzeichnis . . . . .	464	3.2.6	Solare Großanlagen und Import solarer Energieträger . . . . .	495
<b>4. Kapitel</b>			3.2.7	Solarkollektoren und solare Nahwärmesysteme . . . . .	495
<b>Potentiale einzelner Emissionsminderungsmaßnahmen bis zum Jahr 2005 und Ausblick auf 2050 . . . . .</b>		<b>464</b>	3.2.8	Wärmepumpen . . . . .	496
	Vorbemerkung . . . . .	464	3.2.9	Fazit . . . . .	497
1.	Definitionen, Annahmen und Voraussetzungen . . . . .	465	3.3	Technische Potentiale . . . . .	497
1.1	Definitionen . . . . .	465	3.3.1	Einsatzgrenzen und Konkurrenzbeziehungen . . . . .	497
1.2	Annahmen und Voraussetzungen . . .	466	3.3.2	Technisches Potential der Systeme zur Stromerzeugung . . . . .	499
2.	Emissionsvermeidung durch rationelle Energieverwendung und energiebewußtes Verhalten . . . . .	468	3.3.3	Technisches Potential der Systeme zur Wärmeerzeugung . . . . .	499
2.1	Die Rolle der rationellen Energienutzung und -umwandlung . . . . .	469	3.3.4	Technisches Potential aller Systeme . .	499
2.2	Technische Potentiale rationeller Energienutzung aus heutiger Sicht . . . . .	469	3.4	Wirtschaftliche Potentiale . . . . .	499
2.3	Einzelwirtschaftliche Potentiale und Erwartungspotentiale 2005 der rationellen Energienutzung und -umwandlung . . . . .	474	3.4.1	Zur Konkurrenzfähigkeit erneuerbarer Energiequellen . . . . .	499
2.4	Formulierung von Entwicklungsvarianten rationeller Energieverwendung bis 2005 . . . . .	476	3.4.2	Wirtschaftliche Potentiale für Stromerzeugungssysteme . . . . .	501
2.4.1	Raumwärme in privaten Haushalten .	477	3.4.3	Wirtschaftliche Potentiale der Wärmebereitstellungssysteme . . . . .	503
2.4.2	Elektrogeräte und Warmwasser . . . .	478	3.4.4	Wirtschaftliche Potentiale insgesamt .	503
2.4.3	Kleinverbrauch und Industrie . . . . .	479	3.4.5	Wirtschaftliche Potentiale bei höheren Energiepreisen . . . . .	503
2.4.4	Verkehr . . . . .	479	3.5	Hemmnisse und Erwartungspotential bis 2005 . . . . .	506
2.4.5	Umwandlungssektor . . . . .	480	3.6	Maßnahmen . . . . .	508
2.5	Die Rolle der rationellen Energieverwendung zur Verminderung klimarelevanter Emissionen: Erste Hinweise für die Energie- und Umweltpolitik . .	481	4.	Emissionsminderung durch Austausch fossiler Energieträger untereinander .	509
2.6	Hemmnisse rationeller Energieverwendung und Maßnahmen zu ihrer Überwindung . . . . .	483	4.1	Förderpotentiale und langfristige Verfügbarkeit von Erdöl, Erdgas und Kohle . . . . .	509
2.6.1	Zielgruppenübergreifende Hemmnisse und Maßnahmen . . . . .	483	4.2	Mögliche Beiträge des Austauschs fossiler Energieträger untereinander zur Minderung klimarelevanter Spurengasemissionen in der Bundesrepublik Deutschland (ohne ehemalige DDR) . .	511
2.6.2	Sektorspezifische Hemmnisse und Maßnahmen . . . . .	485	4.2.1	Sofortmaßnahmen . . . . .	512
2.7	Die Perspektiven der rationellen Energieverwendung bis 2050 . . . . .	486	4.2.2	Maßnahmen in der nahen Zukunft . .	512
2.8	Energieeinsparung und Emissionsvermeidungspotentiale durch energiebewußtes Verhalten . . . . .	488	4.2.3	Kohlendioxid-Minderungspotentiale in ferner Zukunft . . . . .	515
			4.3	Hemmnisse und offene Fragen . . . . .	515
			5.	Zusammenfassung und Bewertung der Ergebnisse des Studienkomplexes „Nutzung der Kernenergie“ . . . . .	516
			5.1	Minderung klimarelevanter Spurengase durch Kernenergie . . . . .	516
			5.1.1	Stand der Technik und Entwicklungsperspektiven der Kernenergie . . . . .	516

	Seite		Seite
5.1.2	519	6.	569
5.1.3	524	6.1	569
5.1.4	528	6.2	570
5.2	531	7.	573
5.2.1	531	7.1	574
5.2.2	541	7.2	575
5.2.3	544	8.	576
5.3	546	8.1	576
5.3.1	547	8.2	579
5.3.2	553	9.	582
5.3.3	554	10.	582
5.3.4	555	11.	583
5.3.5	555	12.	583
<i>Zusatzvotum der Kommissionsmitglieder Dr. Lippold (Offenbach), Fellner, Seesing, Frau Dr. Segall, Prof. Dr. Dr. Dolzer, Prof. Dr. Michaelis, Prof. Dr. Schikarski zu Abschnitt E, 4. Kapitel, Nr. 5.3: „Bewertung der Möglichkeiten zur Verminderung der CO<sub>2</sub>-Emissionen durch Atomkernenergie von Prof. Dr. Meyer-Abich und Prof. Dr. Heinloth“</i>	555	<b>5. Kapitel</b>	
<i>Zusatzvotum der Kommissionsmitglieder Müller (Düsseldorf), Prof. Dr. Bach, Frau Prof. Gansforth, Frau Dr. Hartenstein, Dr. Kübler zu Abschnitt E, 4. Kapitel, Nr. 5: Zusammenfassung und Bewertung der Ergebnisse des Studienkomplexes „Nutzung der Kernenergie“</i>	557	<b>Wege zu einer klimaverträglichen Energieversorgung — Strategien zu einer Vermeidung energiebedingter klimarelevanter Spurengasemissionen</b>	584
<i>Zusatzvotum des Kommissionsmitglieds Dr. Knabe zu Abschnitt E, 4. Kapitel, Nr. 5.3: „Bewertung der Möglichkeiten zur Verminderung der CO<sub>2</sub>-Emissionen durch Atomkernenergie von Prof. Dr. Meyer-Abich und Prof. Dr. Heinloth“</i>	560	Vorbemerkung	584
<i>Zusatzvotum der Kommissionsmitglieder Prof. Dr. Bach und Prof. Dr. Hennicke zu Abschnitt E, 4. Kapitel, Nr. 5.3: „Bewertung der Möglichkeiten zur Verminderung der CO<sub>2</sub>-Emissionen durch Atomkernenergie von Prof. Dr. Meyer-Abich und Prof. Dr. Heinloth“</i>	563	1.	585
		1.1	585
		1.2	587
		1.2.1	588
		1.2.2	598
		1.2.3	602
		1.3	605
		1.3.1	605
		1.3.2	608
		1.3.3	611
		1.3.4	613
		1.3.4.1	613
		1.3.4.2	615
		<i>Zusatzvotum der Kommissionsmitglieder Dr. Lippold (Offenbach), Fellner, Frau Dr. Segall, Prof. Dr. Dr. Dolzer, Prof. Dr. Heinloth, Prof. Dr. Michaelis, Prof. Dr. Schikarski zu Abschnitt E, 5.</i>	

	Seite		Seite
<i>Kapitel, Nr. 1.3.4.2: „Ausführungen des Öko-Instituts Freiburg zum Kernenergieausstieg 1995“</i> .....	620	1.3.4	Empfehlungen für den Verkehrssektor 663
1.4	Reduktionsszenario „Ausbau der Kernenergie“ .....	1.3.5	Eine CO <sub>2</sub> -Abgabe .....
	623		663
2.	Reduktionsszenarien im Vergleich ...	2.	Kritische Analyse der Ergebnisse des Studienprogramms .....
	629		663
	Vorbemerkung .....	2.1	Auftrag und Vorgaben .....
	629		663
2.1	Überblick und Abgrenzung .....	2.1.1	Das Studienprogramm zur Untersuchung der Möglichkeiten einer Verminderung der Emissionen .....
	629		663
2.2	Ergebnisvergleich .....	2.1.2	Reduktionsziele .....
	631		663
2.3	Diskussion kritischer Punkte .....	2.1.2.1	Das nationale Reduktionsziel als Beitrag zur globalen Verminderung der CO <sub>2</sub> -Emissionen .....
	634		663
2.4	Fazit .....	2.1.2.2	Tragweite .....
	637		663
3.	Ausblick auf 2050 .....	2.1.2.3	Bundesrepublik und Torontoziele/Differenzierungen .....
	638		664
3.1	Referenz-Varianten des Laissez-faire .	2.1.2.4	Die von der Kommission vorgegebene CO <sub>2</sub> -Minderungsstrategie .....
	638		664
3.2	Langfristig erschließbare Kohlendioxid-Reduktionspotentiale .....	2.1.2.5	Wege und Konsequenzen .....
	639		664
4.	Literaturverzeichnis .....	2.1.2.6	Langfristige Zielsetzung .....
	640		665
5.	Tabellenverzeichnis .....	2.2	Vorgelegte Szenarien .....
	640		665
6.	Abbildungsverzeichnis .....	2.2.1	Das Spektrum der Szenarien .....
	641		665
<b>6. Kapitel</b>		2.2.1.1	Grundlegende Daten .....
<b>Überblick über das Studienprogramm der Enquete-Kommission</b> .....	642	2.2.1.2	Status quo — Laissez faire .....
			665
1.	Bearbeiter der zusammenfassenden Energiestudie .....	2.2.1.3	Das Reduktions-Szenario .....
	642		667
2.	Verzeichnis der Projektleiter der Studienkomplexe .....	2.2.1.4	Andere Szenarien .....
	642		667
3.	Verzeichnis der mit den Studien beauftragten Institute .....	2.2.2	Die Entwicklung des Primärenergieverbrauchs und der Emissionen im Rahmen des Reduktions-Szenarios .....
	643		668
4.	Übersicht über die Studienkomplexe .	2.2.3	Rationelle Energieverwendung .....
	644		669
5.	Übersicht über die im Rahmen des Studienprogrammes vergebenen Studien und beauftragten Institute .....	2.2.3.1	Möglichkeiten einer Verminderung der CO <sub>2</sub> -Emissionen .....
	644		669
<i>Erklärung des Kommissionsvorsitzenden zu den Stellungnahmen und Voten zu Abschnitt E</i> .....	658	2.2.3.2	Wege der rationellen Energieverwendung .....
			669
<i>Zusatzvotum der Kommissionsmitglieder Schmidbauer, Dr. Lippold (Offenbach), Frau Schmidt (Spiesen), Frau Dr. Segall, Fellner, Seesing, Prof. Dr. Dr. Dolzer, Prof. Dr. Heinloth, Prof. Dr. Michaelis, Prof. Dr. Schikarski, Prof. Dr. Seiler, Prof. Dr. Zellner zu Abschnitt E: „Nationales Vorgehen zur Reduktion energiegebender klimarelevanter Spurengase“</i> .....	658	2.2.3.3	Vorrang der rationellen Energieverwendung .....
			669
<i>Energie- und umweltpolitisches Programm einer Vorsorge gegen Klimaschäden in einem vereinten Deutschland</i> .....	660	2.2.3.4	Einsparungen durch energiebewußtes Verhalten .....
			670
1.	Zusammenfassung der Erkenntnisse und Ergebnisse .....	2.3	Aspekte einer kritischen Analyse ...
	660		670
1.1	Stand der Diskussion .....	2.4	Instrumentarium — Friktionen — Vermeidungstreben .....
	660		671
1.2	Grundlegende Erwägungen .....	2.4.1	Grundsätzliche Anmerkungen zu den Instrumenten .....
	660		671
1.3	Die wichtigsten Empfehlungen des Programms .....	2.4.1.1	Fragestellungen .....
	661		671
1.3.1	Empfehlungen zur Bereitstellung von Primärenergie .....	2.4.1.2	Zwei grundlegende Vorbemerkungen
	661		671
1.3.2	Empfehlungen zur Energieumwandlung .....	2.4.1.3	Das Instrumentarium .....
	662		672
1.3.3	Empfehlungen zur Energienutzung ..	2.4.1.4	Die Eingriffsebenen .....
	662		672
		2.4.2	Mengenregelnde Eingriffe .....
			673
		2.4.3	Preis- und kostenbeeinflussende Maßnahmen (Steuern und Abgaben) .....
			673
		2.4.4	Friktionen — Vermeidungstreben ...
			673
		2.5	Kosten der Reduktion der CO <sub>2</sub> -Emissionen — Kostenoptimierung — begrenzte Mittel .....
			674
		2.6	Internationaler Wettbewerb .....
			675
		2.6.1	Einbindung der deutschen Wirtschaft in den internationalen Handel .....
			675
		2.6.2	Die Einbindung in die Europäische Gemeinschaft .....
			675

	Seite		Seite
2.6.3	677	3.6.1	689
2.7	677	3.6.2	690
2.7.1	677	3.6.3	690
2.7.2	678	3.7	690
3.	678	3.8	693
3.1	678	4.	696
3.2	679	4.1	696
3.2.1	679	4.2	696
3.2.2	681	4.2.1	696
3.2.3	681	4.2.2	696
3.3	682	4.2.3	697
3.3.1	682	4.2.4	697
3.3.2	682	4.3	698
3.3.3	682	4.4	698
3.3.4	682	4.4.1	698
3.3.5	683	4.4.2	699
3.3.6	684	4.4.3	699
3.3.7	684	4.4.4	700
3.3.8	684	4.4.5	701
3.4	684	4.4.6	702
3.4.1	684	4.5	702
3.4.2	685	4.5.1	702
3.4.3	685	4.5.2	703
3.4.4	685	4.6	706
3.4.5	686	4.6.1	706
3.5	686	4.6.2	706
3.5.1	686	4.6.3	706
3.5.2	687	4.6.4	706
3.5.3	688	4.6.5	708
3.5.4	688	4.6.6	709
3.6	689	4.7	709
		4.8	712
		4.8.1	712
		4.8.2	712
		4.8.3	712

	Seite		Seite
4.8.4	713	5.5.3	724
4.8.5	713	5.5.4	725
4.8.6	713	5.6	725
4.8.7	713	5.7	727
5.	714	Zusatzvotum der Kommissionsmitglieder Prof. Dr. Hennicke und Müller (Düsseldorf) sowie Prof. Dr. Bach, Frau Prof. Ganseforth, Prof. Dr. Graßl, Prof. Dr. Meyer-Abich, Frau Dr. Hartenstein, Dr. Knabe, Dr. Kübler zu Abschnitt E: „Nationales Vorgehen zur Reduktion energiebedingter klimarelevanter Spurengase“	
5.0	714		728
5.1	714	I.	728
5.1.1	714	a)	729
5.1.2	715	b)	730
5.2	715	c)	730
5.2.0	715	d)	730
5.2.1	715	Konsequenz	731
5.2.2	715	II.	731
5.2.3	715	1.	731
5.2.4	716	2.	731
5.2.5	716	3.	733
5.2.6	716	4.	735
5.3	716	a)	735
5.3.0	716	b)	736
5.3.1	716	5.	736
5.3.2	718	5.1	736
5.3.3	718	a)	736
5.3.4	718	b)	736
5.3.5	718	5.2	737
5.3.6	719	a)	737
5.4	719	b)	737
5.4.1	719	c)	738
5.4.2	719	d)	738
5.4.3	720	6.	739
5.4.4	720	7.	740
5.4.5	720	8.	742
5.5	722		
5.5.1	722		
5.5.2	722		

	Seite		Seite
9.	743	Zusatzvotum der Kommissionsmitglieder Prof. Dr. Hennicke und Prof. Dr. Bach zu Abschnitt E: „Nationales Vorgehen zur Reduktion energiebedingter klimarelevanter Spurengase“ . . . . .	757
9.1	743		
9.2	744		
9.3	745	Weitergehende Maßnahmen im Bereich Energie und FCKW . . . . .	757
9.4	746	I. Der ökologische „Umbau“ des Energiesektors . . . . .	757
9.5	746	II. Zielstruktur einer sozial-, umwelt und klimaverträglichen Neuordnung der Energiewirtschaft . . . . .	759
III.	748	III. Kriterien und inhaltliche Eckpunkte eines „Energiespargesetzes“ . . . . .	759
1.	748	1. Kriterien eines möglichst gefährdungsfreien, sozialverträglichen, preisgünstigen sowie umweltverträglichen Energiesystems . . . . .	759
2.	749	2. Gesetzliche Orientierung am Konzept der Energiedienstleistung (EDL) . . . . .	760
3.	749	3. Grundlegende Rolle der Gemeinden und Gemeindeverbände . . . . .	761
4.	749	4. Planung als „Entdeckungsverfahren“ . . . . .	761
5.	750	5. Neuregelung der Organisation und des Auftrags der Aufsicht . . . . .	761
Zusatzvotum des Kommissionsmitglieds Dr. Knabe zu Abschnitt E: „Nationales Vorgehen zur Reduktion energiebedingter klimarelevanter Spurengase“ . . . . .	750	6. Auskunfts- und Mitteilungspflicht . . . . .	762
I.	751	7. Ablösung der Bundestarifordnungen durch Energiepreisordnungen . . . . .	762
II.	752	8. Gesetzliche Einspeiseordnung . . . . .	762
1.	752	9. Rationelle Energienutzung beim Verbraucher . . . . .	762
2.	752	10. Novellierung des Kartellrechts zur Verbesserung der Bedingungen für rationelle und ressourcenschonende Energieversorgung . . . . .	762
3.	752	11. Änderung der Konzessionsabgabenanordnung (KAE). Entflechtung der Gemeindefinanzen und der ÖPNV-Finanzierung von den Energieerlösen . . . . .	763
4.	753	12. Änderung der Gemeindeordnungen . . . . .	763
III.	753	13. Finanzierung und Förderungsprogramme . . . . .	763
A.	753	13.1 Primärenergieabgabe . . . . .	763
B.	754	13.2 Novellierung des III. Verstromungsgesetzes . . . . .	763
IV.	754	13.3 Förderprogramme des Bundes . . . . .	763
V.	755	14. Gründung von Landes-Energiedienstleistungsunternehmen („Energiesparagenturen“) . . . . .	764
A.	755	15. FCKW: Chemiepolitische Forderungen . . . . .	765
B.	756		
VI.	756	Stellungnahme der Kommissionsmitglieder Müller (Düsseldorf), Frau Prof. Ganseforth, Frau Dr. Hartenstein und Dr. Kübler zu den Zusatzvoten des Kommissionsmitglieds Dr. Knabe und der Kommissionsmitglieder Prof. Dr. Bach und Prof. Dr. Hennicke zu Abschnitt E: „Nationales Vorgehen zur Reduktion energiebedingter klimarelevanter Spurengase“ . . . . .	765
VII.	756		
VIII.	757		
	757		

	Seite		Seite
<i>Ergänzendes Votum der Kommissionsmitglieder Prof. Dr. Hennicke und Müller (Düsseldorf), Prof. Dr. Bach, Frau Prof. Ganseforth, Frau Dr. Hartenstein, Dr. Knabe, Dr. Kübler zur Energiewirtschaft in der DDR</i> .....	766	4.6.3 <i>Aktive Solarnutzung: Photovoltaik</i> ...	807
I. <i>Vorbemerkung</i> .....	766	4.7 <i>Heutige Möglichkeiten der Nutzung erneuerbarer Energiequellen in der DDR</i> .....	807
II. <i>Zur Situation der Energieversorgung und Umweltbelastung in der DDR</i> ...	768	5. <i>Rahmenbedingungen für eine rationale Energiepolitik</i> .....	808
1. <i>Struktur- und Effizienz der Energiesysteme der DDR</i> .....	768	5.1 <i>Allgemeine Rahmenbedingungen</i> ....	808
1.1 <i>Primärenergieeinsatz</i> .....	768	5.2 <i>Schwierige Ausgangslage</i> .....	808
1.2 <i>Gebrauchsenergie</i> .....	772	5.3 <i>Kommunale Energieversorgung</i> ....	809
1.3 <i>Stromerzeugung</i> .....	776	5.4 <i>Günstige rechtliche Rahmenbedingungen in der DDR schaffen</i> .....	811
1.4 <i>Stromanwendung</i> .....	781	5.5 <i>Spezielle Maßnahmen für regenerative Energiequellen</i> .....	812
1.5 <i>Wärmeerzeugung- und Anwendung</i> ..	782	6. <i>Förderung der kommunalen Energieversorgung</i> .....	813
1.6 <i>Nichtenergetischer Bereich</i> .....	785	V. <i>Nachbemerkung</i> .....	814
2. <i>Umweltbelastung und Gefährdung durch Braunkohle</i> .....	785	<b>ABSCHNITT F</b>	
2.1 <i>Abbau und Emissionen</i> .....	785	<b>Internationale Strategie zur Reduktion energiebedingter klimarelevanter Spurengasemissionen</b> .....	815
2.2 <i>CO<sub>2</sub>-Emissionen durch Braunkohle</i> ...	789	<b>1. Kapitel</b>	
2.3 <i>Vergleich der Emissionsbelastung im internationalen Vergleich, Bildung von Kennzahlen</i> .....	789	<b>Bisherige internationale und EG-weite Aktivitäten zur Eindämmung des zusätzlichen Treibhauseffektes</b> .....	821
III. <i>Einschätzung und Beurteilung der geplanten energiewirtschaftlichen Projekte und Kooperation</i> .....	791	1. <i>Internationale Konferenzen, Programme und Berichte</i> .....	821
1. <i>Übergreifende Beurteilung der geplanten energiewirtschaftlichen Kooperationen</i> .....	791	1.1 <i>1. Weltklimakonferenz in Genf und Welt-Klima-Programm (1979)</i> .....	822
2. <i>Auswirkungen im Gebiet der DDR</i> ...	791	1.2 <i>Erste Klimakonferenz von Villach (1985)</i> .....	822
3. <i>Auswirkungen der geplanten Projekte auf die BRD</i> .....	792	1.3 <i>Arbeitstagungen von Villach und Bellagio (1987)</i> .....	823
IV. <i>Ausgangspunkte für eine Kooperation zur Umsetzung der Energiewende</i> ...	792	1.4 <i>Bericht der Weltkommission für Umwelt und Entwicklung (Brundtland-Bericht, 1987)</i> .....	823
1. <i>Vorbemerkung</i> .....	792	1.5 <i>Wirtschaftsgipfel von Toronto (1988)</i> .	823
2. <i>Einsparpotentiale</i> .....	792	1.6 <i>Klimakonferenz von Toronto (1988)</i> ..	824
2.1 <i>Einsparpotentiale bei der Stromerzeugung</i> .....	792	1.7 <i>Sachverständigentagung in Ottawa (1989)</i> .....	824
2.2 <i>Einsparpotentiale Stromanwendung</i> ..	793	1.8 <i>Internationale Umweltschutzkonferenz in Den Haag (1989)</i> .....	824
2.2.1 <i>Industrie</i> .....	793	1.9 <i>Wirtschaftsgipfel in Paris (1989)</i> .....	825
2.2.2 <i>Beleuchtung</i> .....	794	1.10 <i>Konferenz über globale Erwärmung und Klimaänderungen in Neu Dehli (1989)</i> .....	825
2.2.3 <i>Haushalte</i> .....	795	1.11 <i>14. Kongreß der Weltenergiekonferenz in Montreal (1989)</i> .....	825
2.2.4 <i>Modellrechnung</i> .....	796	1.12 <i>Internationale Umweltkonferenz über atmosphärische Verschmutzung und Klimaveränderung in Noordwijk (1989)</i> .....	826
2.3 <i>Wärme</i> .....	798	1.13 <i>Nachfolge-Konferenz zum Bericht der Weltkommission über Umwelt und Entwicklung in Bergen (1990)</i> .....	826
3. <i>Kraft-Wärme-Kopplung</i> .....	800	1.14 <i>Saarbrücker Konferenz über Energie, Klima und Entwicklung (1990)</i> .....	827
3.1 <i>Umrüstung von Heizwerken</i> .....	800	1.15 <i>Wirtschaftsgipfel in Houston (1990)</i> ..	827
3.2 <i>BHKW statt Gasheizung</i> .....	800		
4. <i>Regenerative Energiequellen</i> .....	802		
4.1 <i>Bedeutung des Einsatzes erneuerbarer Energiequellen in der DDR</i> .....	802		
4.2 <i>Geothermie</i> .....	803		
4.3 <i>Wasserkraftnutzung</i> .....	803		
4.4 <i>Potentiale der Biomassenutzung</i> ....	803		
4.5 <i>Wind</i> .....	804		
4.6 <i>Sonne</i> .....	805		
<i>Vorbemerkungen</i> .....	805		
4.6.1 <i>Passive Sonnenenergienutzung</i> .....	805		
4.6.2 <i>Aktive Solarnutzung: Kollektoren</i> ....	806		

	Seite		Seite
2. Maßnahmen der EG . . . . .	827	Artikel II: Allgemeine Verpflichtungen . .	846
2.1 Europäischer Rat, EG-Kommission und andere Organe . . . . .	829	Artikel III: Forschung . . . . .	847
2.2 Aktivitäten verschiedener Mitgliedstaaten . . . . .	830	Artikel IV: Messung und Beobachtung . .	847
3. Maßnahmen und Initiativen anderer Länder . . . . .	831	Artikel V: Zusammenarbeit, Informationsaustausch und Koordination bei Forschung, Messung, Beobachtung . . . . .	847
3.1 Skandinavien . . . . .	831	Artikel VI: Öffentlichkeitsarbeit . . . . .	848
3.1.1 Norwegen . . . . .	831	Artikel VII: Konferenz der Vertragsparteien . . . . .	848
3.1.2 Finnland . . . . .	832	Artikel VIII: Sekretariat . . . . .	848
3.1.3 Schweden . . . . .	832	Artikel IX: Beschlußfassung über Protokolle . . . . .	849
3.2 Kanada . . . . .	832	Artikel X: Überprüfung und Änderung des Übereinkommens oder von Protokollen . . . . .	849
3.3 USA . . . . .	832	Artikel XI: Beschlußfassung über Anlagen und Änderung von Anlagen . .	850
3.4 Japan . . . . .	833	Artikel XII: Haushalt . . . . .	850
3.5 Indien . . . . .	833	Artikel XIII: Beilegen von Streitigkeiten . .	851
3.6 Volksrepublik China . . . . .	833	Artikel XIV: Sanktionen . . . . .	851
3.7 Andere Entwicklungsländer . . . . .	834	Artikel XV: Unterzeichnung . . . . .	851
4. Bestehende und vorgeschlagene internationale Vereinbarungen . . . . .	834	Artikel XVI: Ratifikation, Annahme oder Genehmigung . . . . .	851
4.1 Wiener Übereinkommen zum Schutz der Ozonschicht und Montrealer Protokoll über Stoffe, die zu einem Abbau der Ozonschicht führen . . . . .	834	Artikel XVII: Beitritt . . . . .	851
4.2 Internationale Konvention zum Schutz tropischer Wälder . . . . .	835	Artikel XVIII: Stimmrecht . . . . .	852
4.3 Übereinkommen über weiträumige grenzüberschreitende Luftverunreinigung und daraus abgeleitete Protokolle . . . . .	836	Artikel XIX: Verhältnis zwischen den Rahmenübereinkommen und seinen Protokollen . . . . .	852
5. Internationale Regierungsorganisationen . . . . .	836	Artikel XX: Inkrafttreten . . . . .	852
5.1 Umweltprogramm der Vereinten Nationen (UNEP) . . . . .	837	Artikel XXI: Vorbehalte . . . . .	852
5.2 Weltorganisation für Meteorologie (WMO) . . . . .	838	Artikel XXII: Rücktritt . . . . .	852
5.3 Intergouvernementaler Ausschuß über Klimaänderungen (IPCC) . . . . .	839	Artikel XXIII: Verwahrer . . . . .	852
5.4 Internationaler Rat wissenschaftlicher Vereinigungen (ICSU) . . . . .	840	Artikel XXIV: Verbindlicher Wortlaut . . . . .	853
6. Bewertung . . . . .	840	4. Mögliche Zusatzvereinbarungen einer Internationalen Konvention über Klima und Energie . . . . .	853
7. Literaturverzeichnis . . . . .	841	4.1 Das Protokoll über die Reduktion energiebedingter klimarelevanter Spurengasemissionen (Spurengas-Protokoll) .	853
8. Tabellenverzeichnis . . . . .	842	4.1.1 Globale Reduktionsziele für die Jahre 2005, 2020 und 2050 . . . . .	854
9. Abbildungsverzeichnis . . . . .	842	4.1.2 Zur Höhe und Verteilung der Reduktionspflichten für die Industrieländer .	857
<b>2. Kapitel</b>		– Wirtschaftliche Leistungskraft der Vertragsparteien . . . . .	858
<b>Empfehlungen zur Ausgestaltung einer Internationalen Konvention über Klima und Energie und möglicher Zusatzvereinbarungen . .</b>	<b>842</b>	– Energieintensität . . . . .	858
1. Anforderungen an eine Internationale Konvention über Klima und Energie .	843	– Bestehende Energieträgerstruktur .	858
2. Schlußfolgerungen für die Ausgestaltung und Struktur einer Internationalen Konvention über Klima und Energie . . . . .	844	– Ausfuhr-/Einfuhrbilanz energieintensiver Produkte und Verfahren .	859
3. Vorschlag für eine Internationale Konvention über Klima und Energie . . . .	845	– Zugehörigkeit zu einer Ländergruppe . . . . .	859
Präambel . . . . .	845	– Pro-Kopf-Emissionen . . . . .	859
Artikel I: Begriffsbestimmungen . . . . .	846	– Einfluß des Klimas auf den Energieverbrauch . . . . .	859
		– Bevölkerungsentwicklung . . . . .	859
		– Einfluß großer Migrationen, insbesondere Flüchtlingsströme . . . . .	861
		– Kumulierte Emissionen . . . . .	862



	Seite		Seite
— Emissionen pro Landfläche . . . . .	862	<b>ABSCHNITT G</b>	
— Zu erwartendes Ausmaß der regionalen Folgen des zusätzlichen Treibhauseffektes . . . . .	862	<b>Gesamtstrategie zum Schutz der Erdatmosphäre . . . . .</b>	869
4.2 Internationaler Treuhandfonds zur Reduktion energiebedingter klimarelevanter Spurengasemissionen . . . . .	862	<b>1. Kapitel</b>	
5. Literaturverzeichnis . . . . .	863	<b>Politische Maßnahmen . . . . .</b>	870
6. Tabellenverzeichnis . . . . .	863	1. Das Vertragswerk zum Schutz der Erdatmosphäre . . . . .	870
7. Abbildungsverzeichnis . . . . .	863	2. Schaffung eines Umweltrates . . . . .	876
<b>3. Kapitel</b>		3. Empfehlungen . . . . .	878
<b>Empfehlungen zur Implementation des Übereinkommens und der Protokolle . . . . .</b>	864	4. Literaturverzeichnis . . . . .	878
1. Schrittmacherrolle verschiedener Industrienationen, insbesondere der Bundesrepublik Deutschland . . . . .	864	5. Tabellenverzeichnis . . . . .	879
2. Handlungsempfehlungen für die EG . . . . .	864	6. Abbildungsverzeichnis . . . . .	879
3. Handlungsempfehlungen für das internationale Vorgehen . . . . .	865	<b>2. Kapitel</b>	
4. Literaturverzeichnis . . . . .	866	<b>Forschungsempfehlungen . . . . .</b>	879
<i>Zusatzvotum der Kommissionsmitglieder Müller (Düsseldorf), Prof. Dr. Bach, Prof. Dr. Dr. Crutzen, Frau Prof. Ganseforth, Prof. Dr. GraBl, Frau. Dr. Hartenstein, Prof. Dr. Hennicke, Dr. Kübler, Prof. Dr. Meyer-Abich, Dr. Knabe zu Abschnitt F: „Internationale Strategie zur Reduktion energiebedingter klimarelevanter Spurengasemissionen“ . . . . .</i>	866	1. Notwendigkeit satellitengestützter Fernerkundung . . . . .	879
1. <i>Die Teilung der Welt durch Teilen überwinden . . . . .</i>	866	2. Leistungsfähigkeit eines Atmosphären-Umweltforschungssatelliten (ATMOS) . . . . .	879
2. <i>Die Bedeutung der Entwicklungsländer . . . . .</i>	866	3. Projektstatus und Finanzierbarkeit eines Atmosphären- und Umweltsatelliten (ATMOS) . . . . .	880
3. <i>Ökonomische Anreizinstrumente notwendig . . . . .</i>	866	4. Empfehlungen . . . . .	881
4. <i>Wirksame Sanktionsregelungen . . . . .</i>	867	Protokollnotiz des Kommissionsmitglieds Prof. Dr. Hennicke zu Abschnitt G, 2. Kapitel, Nr. 4 „Empfehlungen“ . . . . .	881
5. <i>Rechtsform überdenken . . . . .</i>	868	<b>ANHANG</b>	
		1. Gesamtliteraturverzeichnis . . . . .	883
		2. Begriffserläuterungen . . . . .	904
		3. Abkürzungsverzeichnis . . . . .	922
		4. Chemische Formeln . . . . .	925
		5. Vorsätze- und Vorsatzzeichen-Erklärungen . . . . .	925
		6. Verzeichnis der Kommissionsdrucksachen . . . . .	926



**Abschnitt A****Zusammenfassung –****Problemdarstellung, bisherige Arbeit der Kommission und Handlungsempfehlungen im Überblick**

## 1. KAPITEL

## Problemdarstellung im Überblick

Die Veränderungen der Erdatmosphäre, der zusätzliche Treibhauseffekt und die daraus resultierenden Klimaänderungen und Folgewirkungen sowie damit zusammenhängend die Rolle der klimarelevanten Emissionen aus dem Energiebereich, der Abbau der Ozonschicht in der Stratosphäre sowie die Vernichtung der tropischen Wälder stellen eine weltweite Gefährdung für die Menschheit und die ganze Biosphäre der Erde dar. Werden keine wirksamen Gegenmaßnahmen ergriffen, ist mit dramatischen Folgen für alle Regionen der Erde zu rechnen.

Die Abwendung dieses globalen Gefährdungspotentials oder – da ein Teil der Entwicklung schon nicht mehr zu vermeiden ist – zumindest seine Eindämmung ist zu einer der großen Herausforderungen für die Menschheit geworden. Maßnahmen, die der gegenwärtig beobachteten Veränderungen der Erdatmosphäre durch den Menschen Einhalt gebieten, sind daher dringend notwendig und erfordern neben entschlossenem nationalen Handeln eine weitreichende und umfassende internationale Zusammenarbeit.

**1. Zusätzlicher Treibhauseffekt und weltweite Klimaänderungen**

Der natürliche Treibhauseffekt, der von den Gasen Wasserdampf ( $H_2O$ ), Kohlendioxid ( $CO_2$ ), Ozon ( $O_3$ ), Distickstoffoxid ( $N_2O$ ) und Methan ( $CH_4$ ), ihrer Bedeutung nach gereiht, hervorgerufen wird, bewirkt, daß die heutige Durchschnittstemperatur auf der Erde in Bodennähe rund  $15\text{ °C}$  beträgt. Ohne diesen natürlichen Treibhauseffekt würde die globale Durchschnittstemperatur bei etwa  $-18\text{ °C}$  liegen.

Seit Beginn der Industrialisierung sind die Konzentrationen dieser Treibhausgase in der Atmosphäre durch menschliche Tätigkeit angestiegen und zusätzliche Treibhausgase, vor allem die FCKW, hinzugekommen. Durch diesen zusätzlichen Treibhauseffekt wird der natürliche Treibhauseffekt verstärkt.

Der Anstieg der globalen Durchschnittstemperatur um  $0,5\text{ °C}$  in den vergangenen 100 Jahren sowie der Anstieg des Meeresspiegels um 10 bis 20 cm im selben Zeitraum sind wahrscheinlich bereits auf den vom

Menschen verursachten, zusätzlichen Treibhauseffekt zurückzuführen.

Nach dem gegenwärtigen wissenschaftlichen Kenntnisstand wird sich die globale Mitteltemperatur um etwa  $5\text{ °C}$  (wahrscheinlichster Wert, wobei ein Unsicherheitsbereich von 3 bis  $9\text{ °C}$  angegeben wird) gegenüber ihrem vorindustriellen Wert erhöhen, wenn die Emissionen von Treibhausgasen (Kohlendioxid, Fluorchlorkohlenwasserstoffe, Methan, Distickstoffoxid sowie Stickoxide, Kohlenmonoxid und flüchtige organische Verbindungen (außer Methan), aus denen sich Ozon in der Troposphäre bildet) mit denselben Raten wie zur Zeit bis zum Jahre 2100 ansteigen. Bis zu diesem Zeitpunkt werden von den  $5\text{ °C}$  Erwärmung etwa  $4\text{ °C}$  realisiert sein, da der Ozean die Erwärmung um einige Jahrzehnte verzögert. Diese Erwärmung in gut 100 Jahren wäre genauso groß wie die Erwärmung seit der letzten Eiszeit vor 18 000 Jahren (vgl. Abb. 2).

Wenn der Trend der Emissionen bis zum Jahr 2025 unverändert anhält, wird sich die globale Mitteltemperatur um etwa  $2,5\text{ °C}$  (wahrscheinlichster Wert, wobei ein Unsicherheitsbereich von  $1,5$  bis  $4,5\text{ °C}$  angegeben wird) über ihren vorindustriellen Wert erhöhen. Bis zum Jahr 2025 wird wegen der verzögernden Wirkung der Ozeane davon eine Temperaturerhöhung von etwa  $2\text{ °C}$  realisiert sein.

Diese Ergebnisse stützen sich auch auf seit kurzem vorhandene Klimamodelle, die die Atmosphäre und den Ozean koppeln. Die Größenordnung der Erwärmung wird durch Beobachtungen aus der Klimageschichte (Paläoklimatologie) gestützt.

Die Erwärmung wird sich gravierend auf die Ökosysteme und damit auf den Menschen auswirken, da sich die Atmosphäre während der vergangenen 10 000 Jahre nie so schnell erwärmt hat. Die Temperatur wird im Mittel um  $0,3\text{ °C}$  pro Dekade ansteigen, dreimal so schnell wie es natürliche Ökosysteme nach heutigem Wissen noch vertragen können. Es ist wahrscheinlich, daß wegen der starken natürlichen Schwankungen des Klimasystems zwischenzeitlich noch höhere Erwärmungsraten auftreten. Da die Temperatur so außerordentlich schnell steigt, werden sich die Klimazonen schneller verschieben, als die Vegeta-

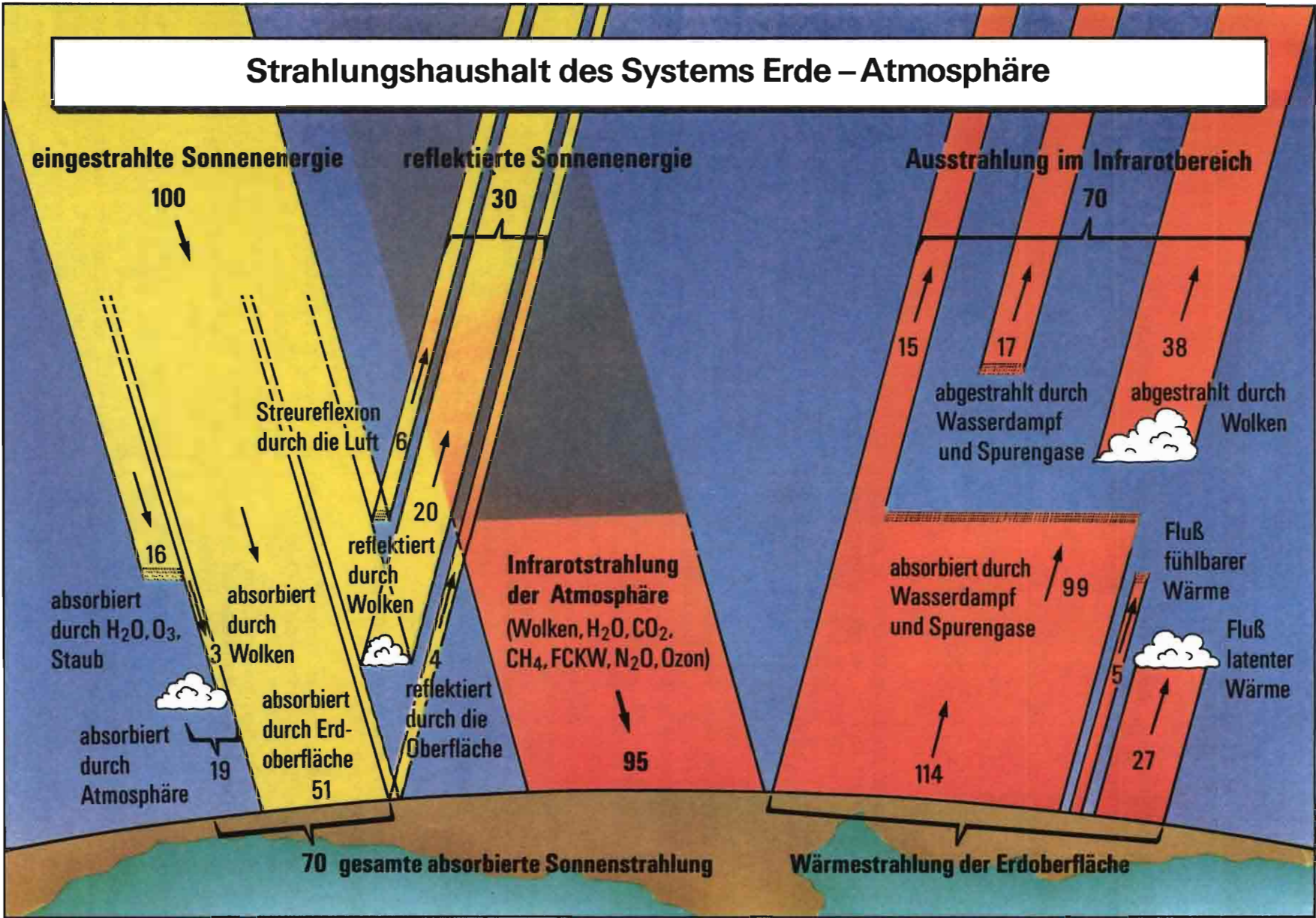


Abb. 1: Strahlungshaushalt des Systems Erde – Atmosphäre. Verteilung der einfallenden Sonnenstrahlung auf Erdboden und Erdatmosphäre. Am Rand der Atmosphäre und am Erdboden wird jeweils die Bilanzsumme gebildet. Die linke Seite beschreibt die kurzwelligen Strahlungsflüsse, die rechte Seite die langwelligen Strahlungsflüsse von Erde und Atmosphäre. Bezugsgröße, das heißt der Wert 100, ist jeweils die am Außenrand der Atmosphäre einfallende Sonnenstrahlung. Änderungen der Konzentration der Treibhausgase führen zu Veränderungen der Temperatur.

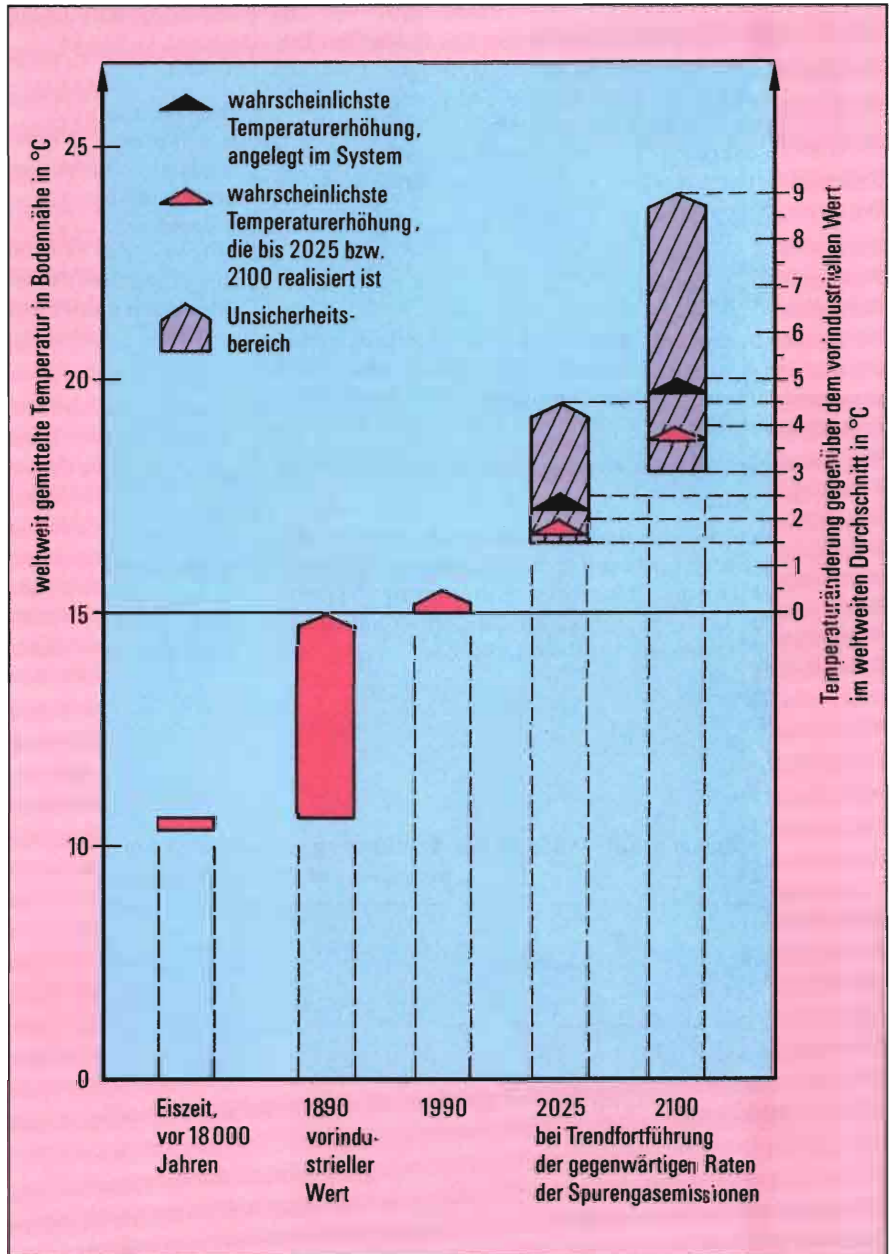


Abb. 2: Temperaturerhöhung seit der letzten Eiszeit (seit 18 000 Jahren) und zu erwartende Temperaturerhöhungen gegenüber dem vorindustriellen Wert bei einer Trendfortführung der gegenwärtigen Raten der Spurengasemissionen bis zu den Jahren 2025 und 2100.

tionszonen folgen können. Die unbelastete Vegetation kann vermutlich einer Temperaturerhöhung um 0,1°C pro Dekade gerade noch unbeschadet folgen. Eine bereits belastete Vegetation – wie die vom Waldsterben heimgesuchten Wälder in großen Teilen Europas – wird bereits durch eine geringere Erwärmung irreversibel geschädigt.

Die Aussage dieses Berichtes, daß sich die Erdatmosphäre um 3 bis 9°C gegenüber dem vorindustriellen Wert erwärmen wird, wenn bis zum Jahre 2100 die Emissionen mit derzeitigem Trend weiter steigen, entspricht der früheren Aussage der Kommission in ihrem ersten Bericht. Demzufolge wird sich die Temperatur um 1,5 bis 4,5°C durch eine Verdopplung der CO<sub>2</sub>-Konzentration in der Atmosphäre und um 3 bis 9°C durch eine Vervielfachung erhöhen. Dasselbe gilt für

eine Verdopplung beziehungsweise eine Vervielfachung der äquivalenten CO<sub>2</sub>-Konzentration, das heißt für einen Anstieg der Konzentrationen aller Treibhausgase in einem Maße, daß die gleiche Strahlungswirkung entsteht wie durch eine Verdopplung beziehungsweise Vervielfachung der CO<sub>2</sub>-Konzentration allein. Die äquivalente CO<sub>2</sub>-Konzentration wird sich bei anhaltendem Trend etwa bis zum Jahr 2025 verdoppeln und bis zum Zeitabschnitt von 2080 bis 2100 vervierfachen.

Die globale Erwärmung führt bei unverändertem Trend der Emissionen unter anderem zu einem Anstieg des Meeresspiegels um 60 cm (Unsicherheitsbereich 30 bis 100 cm) bis zum Jahr 2100 und einem weiteren Anstieg in den folgenden Jahrhunderten. Dieser Anstieg kommt zum einen durch das größere

Volumen des wärmeren Ozeanwassers und zum anderen durch das Abschmelzen von Eis zustande. Bereits bei einem Anstieg des Meeresspiegels um 30 bis 50 cm werden viele küstennahe Gebiete und Inseln überschwemmt und die dort lebende Bevölkerung vertrieben werden. Weiterhin muß bereits in naher Zukunft mit folgenden, sich laufend verstärkenden Auswirkungen gerechnet werden:

- Verschiebung der Klimazonen, zum Beispiel der Wüstenregionen;
- großräumiges klimabedingtes Waldsterben in den mittleren und höheren Breiten, das in den durch Immissionen vorgeschädigten Wäldern sehr schnell vordringen kann;
- Beeinträchtigung der Wasserressourcen vieler Gebiete;
- Verschlechterung der Ernährungssituation großer Teile der Menschheit durch Klimaanomalien (zum Beispiel Dürren, Überschwemmungen), Mißernten, vermehrte Schäden an landwirtschaftlichen Kulturpflanzen und andere Ursachen.

Dies alles wird Hunger, Elend und Umweltflüchtlingsströme in bisher nicht gekanntem Ausmaß zur Folge haben.

Der Problemdruck erhöht sich zudem dadurch, daß sich der zusätzliche Treibhauseffekt einerseits und die Ozonzerstörung durch die FCKW in der Stratosphäre andererseits wechselseitig beeinflussen. Des weiteren müssen auch zusätzliche, verstärkende Rückkopplungen wie die Methanfreisetzung nach dem Auftauen der arktischen Permafrostböden, die heute noch nicht oder noch nicht merklich wirksam sind, berücksichtigt werden.

Zum zusätzlichen, vom Menschen verursachten weltweiten Treibhauseffekt tragen die Treibhausgase mit den in Tabelle 1 angegebenen Anteilen bei.

Die direkten Treibhausgase Kohlendioxid (CO<sub>2</sub>), Fluorchlorkohlenwasserstoffe (FCKW), Methan (CH<sub>4</sub>) und Distickstoffoxid (N<sub>2</sub>O), sowie die weiteren klimarelevanten Spurengase, die an der Bildung von Ozon in der Troposphäre beteiligt sind – das heißt in erster Linie Stickoxide (NO<sub>x</sub>), Kohlenmonoxid (CO) und flüchtige organische Verbindungen außer Methan

Tabelle 1

**Prozentuale Anteile der Treibhausgase weltweit am zusätzlichen Treibhauseffekt bezogen auf ihre Konzentration<sup>1)</sup>**

Treibhausgase	1. kumuliert für die Zeitperiode von 1860 bis 1980	2. aktuelle Werte der achtziger Jahre: Zeitperiode von 1980 bis 1990
Kohlendioxid (CO <sub>2</sub> )	60 %	50 %
Fluorchlorkohlenwasserstoffe (FCKW)	9 %	22 %
Ozon (O <sub>3</sub> ) (Ozon wird aufgrund der Emission von Stickoxiden (NO <sub>x</sub> ), NMVOC, Kohlenmonoxid (CO) etc. gebildet) <sup>2)</sup>	10 %	7 % <sup>3)</sup>
Methan (CH <sub>4</sub> )	14 %	13 %
Distickstoffoxid (N <sub>2</sub> O)	3 %	5 %
stratosphärischer Wasserdampf (H <sub>2</sub> O)	4 %	3 % <sup>3)</sup>

<sup>1)</sup> In Tabelle 1 werden sowohl die kumulierten Anteile der einzelnen Treibhausgase seit Beginn der Industrialisierung bis zum Jahr 1980 (1. Spalte) als auch die derzeitigen Anteile der achtziger Jahre (2. Spalte) gerundet angegeben. Die in der zweiten Spalte angegebenen Anteile für die Zeitperiode von 1980 bis 1990 weichen aufgrund neuerer Berechnungen teilweise von den Angaben des ersten Berichtes der Kommission aus dem Jahr 1988 ab. Der Anteil des Methans wird beispielsweise als geringer angegeben, da hier nur die direkte Wirkung von Methan berücksichtigt wird (vgl. Abschnitt C, 1. Kapitel, 3.1). Eine Reduktion der prozentualen Werte beim Vergleich der Spalten 1 und 2 bedeutet wegen der hohen Zuwachsraten trotzdem noch einen Anstieg der absoluten Konzentration dieser Spurengase.

Im Abschlußbericht des Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) vom Sommer 1990 werden nur die prozentualen Anteile der Spurengase CO<sub>2</sub> mit 55 Prozent, FCKW mit 25 Prozent, CH<sub>4</sub> mit 14 Prozent und N<sub>2</sub>O mit 6 Prozent angegeben und die Prozentzahlen auf die Summe dieser Werte bezogen. Die Anteile für das Ozon in der Troposphäre und für den Wasserdampf in der Stratosphäre sind dort in den entsprechenden Tabellen wegen der großen Unsicherheitsbereiche nicht erfaßt. Deshalb differieren die prozentualen Anteile der Treibhausgase in Tabelle 1 von denen des IPCC-Abschlußberichtes, während dagegen die Werte der absoluten Beiträge der einzelnen Spurengase übereinstimmen (vgl. Abschnitt C, 1. Kapitel).

<sup>2)</sup> Der Anstieg der Ozonkonzentration ist auf die untere Atmosphäre der nördlichen Hemisphäre begrenzt. Die Angaben der Ozonanteile beruhen auf Schätzungen, da die Änderungen der Ozonkonzentration nicht gemessen sind, sondern aus Chemie-modellen erschlossen sind. NMVOC sind flüchtige organische Verbindungen (außer Methan).

<sup>3)</sup> Hierbei ist auf Unsicherheiten der angegebenen Werte hinzuweisen, da in die Berechnungen noch kein Klimamodell mit vollständigen chemischen Rückkopplungen einbezogen worden ist, das zu etwas anderen Werten führen könnte.

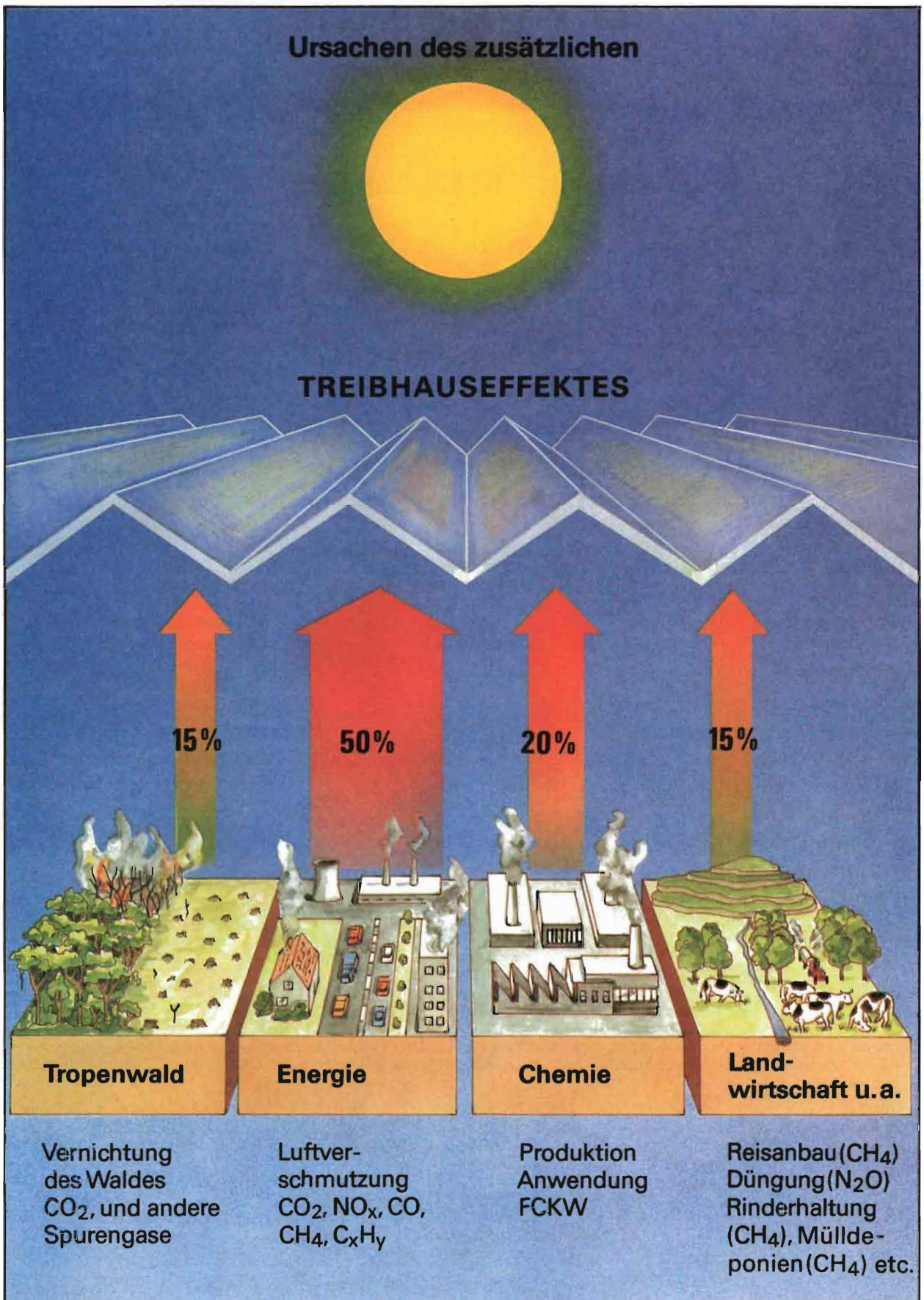


Abb. 3: Ursachen des zusätzlichen Treibhauseffektes: Gerundete Anteile durch die Bereiche, die zuvor erläutert sind (vgl. Tab. 1 und 2)

Tabelle 2

**Derzeitige Anteile der verschiedenen Verursacherbereiche weltweit am zusätzlichen, anthropogen bedingten Treibhauseffekt<sup>1)</sup>**

(CO<sub>2</sub>=Kohlendioxid; CH<sub>4</sub>=Methan; NO<sub>x</sub>=Stickoxide; CO=Kohlenmonoxid; NMVOC=flüchtige organische Verbindungen (außer Methan); FCKW=Fluorchlorkohlenwasserstoffe; N<sub>2</sub>O=Distickstoffoxid=Lachgas)

Verursachergruppen	Anteile (grob gerundet)	Aufteilung auf die Spurengase (grob gerundet)	Ursachen
Energie einschließlich Verkehr	50 %	40% CO <sub>2</sub> , 10% CH <sub>4</sub> u. O <sub>3</sub> (O <sub>3</sub> wird durch die Vorläufersubstanzen NO <sub>x</sub> , CO und NMVOC gebildet)	Emissionen der Spurengase aufgrund der Nutzung der fossilen Energieträger Kohle, Erdöl und Erdgas sowohl im Umwandlungsbereich, insbesondere bei der Strom- und Fernwärmeerzeugung sowie Raffinerien, als auch in den Endenergiesektoren Haushalte, Kleinverbrauch (Handwerk, Dienstleistungen, öffentliche Einrichtungen etc.), Industrie und Verkehr
Chemische Produkte (FCKW, Halone u. a.) <sup>2)</sup>	20 %	20% FCKW, Halone etc.	Emissionen der FCKW, Halone etc.
Vernichtung der Tropenwälder	15 %	10% CO <sub>2</sub> , 5% weitere Spurengase, insb. N <sub>2</sub> O, CH <sub>4</sub> und CO	Emission durch die Verbrennung und Verrottung tropischer Wälder einschließlich verstärkter Emissionen aus dem Boden
Landwirtschaft und andere Bereiche (Mülldeponien etc.)	15 %	15%, in erster Linie CH <sub>4</sub> , N <sub>2</sub> O und CO <sub>2</sub>	Emissionen aufgrund von: – anaeroben Umsetzungsprozessen (CH <sub>4</sub> durch Rinderhaltung, Reisfelder etc.) – Düngung (N <sub>2</sub> O) – Mülldeponien (CH <sub>4</sub> ), – Zementherstellung (CO <sub>2</sub> ) – etc.

<sup>1)</sup> Die Enquete-Kommission hat diese gerundeten Werte bereits in den vergangenen Monaten angegeben. Im Hinblick auf die Spannweite der Anteile der einzelnen Spurengase am zusätzlichen Treibhauseffekt und auf die großen Unsicherheitsbereiche bei der Zuordnung der einzelnen Treibhausgase zu den verschiedenen Bereichen können gegenwärtig nur grob gerundete Näherungswerte angegeben werden (vgl. dazu auch Tab. 1 und 2, Abb. 3 sowie Abschnitt C, 1. Kapitel). Die hier angegebenen Anteile stimmen im Rahmen der vorhandenen Spannweiten und Unsicherheiten mit den Werten des IPCC-Abschlußberichtes vom Sommer 1990 überein.

Dieser IPCC-Bericht gibt für die einzelnen Bereiche folgende Anteile und Spannweiten an:

- Energie: 46 % (38 bis 54 %),
- chemische Produkte (FCKW, Halone u. a.): 24 % (keine Angabe von Spannweiten, obwohl die Absorptionskoeffizienten im Verhältnis zu denen von CO<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub> und N<sub>2</sub>O unsicher sind),
- Zerstörung der Wälder: 18 % (9 bis 26 %),
- Landwirtschaft: 9 % (4 – 13 %),
- andere Bereiche (Mülldeponien, Zementherstellung etc.): 3 % (1–4 %)

<sup>2)</sup> FCKW, Halone und andere Verbindungen, die sowohl zu einem Abbau der Ozonschicht in der Stratosphäre als auch zum zusätzlichen Treibhauseffekt beitragen



(NMVOC) – sind nach dem derzeitigen wissenschaftlichen Kenntnisstand weltweit gegenwärtig folgenden Bereichen mit den genannten (gerundeten) Anteilen zuzuordnen (vgl. auch Tab. 1 und 2 sowie Abb. 3):

- dem Energiebereich einschließlich des Verkehrsbereichs mit einem Anteil von rund 50 Prozent infolge der Nutzung der fossilen Energieträger Kohle, Erdöl und Erdgas:
  - rund 40 Prozent CO<sub>2</sub>,
  - rund 10 Prozent weitere energiebedingte Spurengase, insbesondere Methan (CH<sub>4</sub>) und Ozon der Troposphäre, das aufgrund der Emissionen von Stickoxiden (NO<sub>x</sub>), Kohlenmonoxid (CO) und flüchtigen organischen Verbindungen außer Methan (NMVOC) gebildet wird;
- dem Bereich chemischer Produkte und ihrer Anwendungen mit einem Anteil von rund 20 Prozent wegen der Emissionen von Fluorchlorkohlenwasserstoffen (FCKW), Halonen und anderen Verbindungen, die sowohl zum Abbau der Ozonschicht in der Stratosphäre als auch zum zusätzlichen Treibhauseffekt beitragen;
- dem Prozeß der Vernichtung vor allem der tropischen Wälder mit einem Anteil von rund 15 Prozent:
  - rund 10 Prozent Kohlendioxid (CO<sub>2</sub>),
  - rund 5 Prozent weitere Spurengase, die in erster Linie durch die Verbrennung und Verrottung der Wälder freigesetzt werden, insbesondere Distickstoffoxid (N<sub>2</sub>O), Kohlenmonoxid (CO) und Methan (CH<sub>4</sub>);
- der Landwirtschaft und anderen Bereichen mit einem Anteil von rund 15 Prozent:
 

in erster Linie Methan (CH<sub>4</sub>) durch Rinderhaltung, Naßreisbau und anderes, Distickstoffoxid (N<sub>2</sub>O) infolge von Düngung, Methan infolge von Mülldeponien, CO<sub>2</sub> infolge der Zementherstellung etc.

## 2. Klima und Energie – Emissionen energiebedingter klimarelevanter Spurengase

Bei der Gewinnung von Kohle, Erdöl und Erdgas, beim Transport und der Verteilung von Erdgas, bei der Energieumwandlung in Kraftwerken und Raffinerien und bei sonstigen Umwandlungsprozessen sowie bei der Nutzung der fossilen Energieträger Kohle, Erdöl und Erdgas in den Endenergiesektoren Haushalte, Kleinverbrauch (Handwerk, Dienstleistungsbereich, öffentliche Einrichtungen etc.), Industrie und Verkehr trägt der Energiebereich weltweit mit insgesamt rund 50 Prozent zum zusätzlichen Treibhauseffekt bei. Dieser Beitrag wird verursacht durch die Emission von Kohlendioxid (rund 40 Prozent) und die Emissionen von Methan, Stickoxiden, Kohlenmonoxid und flüchtigen organischen Verbindungen ohne Methan (zusammen rund 10 Prozent).

Im Jahr 1987, das als Basisjahr bei den Studien der Enquete-Kommission verwendet wurde, trugen

- die fossilen Energien mit einem Anteil von 88,1 Prozent,
- die Wasserkraft mit einem Anteil von 6,7 Prozent
- und die Kernenergie mit einem Anteil von 5,2 Prozent zum gesamten kommerziellen Primärenergieverbrauch der Welt in Höhe von 327 Exajoule (gleich 11,2 Milliarden Tonnen Steinkohleeinheiten (Mrd. t SKE)) bei.

Die weltweiten Kohlendioxid-Emissionen aus dem kommerziellen Energiebereich betragen im Basisjahr 1987 rund 20,5 Milliarden Tonnen. Dabei wurden dem nichtenergetischen Energieverbrauch (beispielsweise für Kunststoffe, chemische Fasern oder Bitumen) hier keine Emissionen zugeordnet. Aufgrund der Datelage muß ein Fehler in der Größenordnung von +/- 10 Prozent angenommen werden.

In den vergangenen beiden Jahrzehnten stieg der weltweite Energieeinsatz jährlich um durchschnittlich rund 2 Prozent, wobei der Anstieg im Jahr 1989 rund 3,5 Prozent betrug. Wenn der Trend des Energieverbrauchs der vergangenen beiden Jahrzehnte sich unverändert fortsetzen würde, würden sich gemäß den im Studienprogramm der Kommission untersuchten Energieszenarien die weltweiten Emissionen aus dem Energiebereich – bezogen auf das hier verwendete Basisjahr 1987 – bis zum Jahr 2005 um rund 40 Prozent erhöhen und bis zum Jahr 2050 etwa verdoppeln. Die Eindämmung des zusätzlichen Treibhauseffektes erfordert es jedoch, bezogen auf die Werte des Jahres 1987,

- die Emission von Kohlendioxid bis zur Mitte des nächsten Jahrhunderts zu halbieren, das heißt gegenüber der Trendentwicklung (Verdoppelung bis zum Jahr 2050) um 75 Prozent zu vermindern sowie
- die Emissionen der weiteren energiebedingten klimarelevanten Spurengase, in erster Linie von Methan, Stickoxiden, Kohlenmonoxid und flüchtigen organischen Verbindungen (ohne Methan), um mehr als 50 Prozent zu reduzieren.

Dabei ist von folgender Situation auszugehen:

Die westlichen und östlichen Industrieländer mit einem Bevölkerungsanteil von rund 25 Prozent emittieren heute zusammen rund 80 Prozent des CO<sub>2</sub>, die Entwicklungsländer (einschließlich China) mit einem Bevölkerungsanteil von rund 75 Prozent emittieren zusammen rund 20 Prozent. (Die Emissionsanteile von 80 Prozent in den Industrieländern und 20 Prozent in den Entwicklungsländern sind dabei als grobe Näherung anzusehen, da die Aufteilung je nach Zugehörigkeit zu einer der beiden Ländergruppen schwankt und zukünftig eine differenzierte Erfassung erfolgen muß.)

Im Hinblick auf die erforderliche Verringerung der weltweiten Emissionen erwächst den Industrieländern die Aufgabe, ihre hohen Pro-Kopf-Emissionen erheblich zu reduzieren. Die Entwicklungsländer sind vor die Aufgabe gestellt, ihren Energieeinsatz so effizient wie möglich und mit geringstmöglichen Emissionen zu gestalten. Da der Energiebedarf unter anderem auch von der Bevölkerungszahl abhängt, stehen

die Entwicklungsländer zusätzlich vor der schwierigen Aufgabe, ihre gegenwärtig hohen Bevölkerungszuwachsraten mit geeigneten Maßnahmen zu begrenzen, was aus einer Reihe anderer Gründe, wie der Bekämpfung von Hunger und Armut, ohnehin notwendig ist.

Die EG verbrauchte im Bezugsjahr 1987 insgesamt rund 44 Exajoule, also rund 1,5 Milliarden Tonnen Steinkohleeinheiten; das entspricht etwa einem Siebtel (rund 14,3 Prozent) des kommerziellen, weltweiten Energieverbrauchs. Dabei entfielen rund 85 Prozent auf die Verbrennung fossiler Energieträger.

Die EG emittierte im Jahr 1986 rund 2,8 Milliarden Tonnen CO<sub>2</sub>, was etwa 14,2 Prozent der weltweiten Emissionen entspricht. Rechnet man die Emissionen der ehemaligen DDR für dieses Jahr in die EG-Werte ein, so ergeben sich Emissionen von rund 3,2 Milliarden Tonnen CO<sub>2</sub> beziehungsweise ein Anteil von rund 16 Prozent an den weltweiten Emissionen.

In bezug auf die nationale Situation ergibt sich folgendes Bild:

Im Jahr 1987 betrug der Primärenergieverbrauch der Bundesrepublik Deutschland rund 11,4 Exajoule, das sind 388 Millionen Tonnen Steinkohleeinheiten, wovon die fossilen Energien einen Anteil von etwa 86 Prozent hatten.

Aufgrund des Energieverbrauchs wurden von der Bundesrepublik Deutschland im Jahr 1987 rund 715 Millionen Tonnen CO<sub>2</sub> emittiert (endenergieseitig berechnet, ohne nichtenergetischen Verbrauch, unter Einbeziehung des bundesdeutschen Anteils am internationalen Flugverkehr). Das entspricht etwa 3,5 Prozent der weltweit freigesetzten Menge von rund 20,5 Milliarden Tonnen CO<sub>2</sub> aus dem kommerziellen Energiebereich. Pro Einwohner wurden von der Bundesrepublik Deutschland rund 11,7 Tonnen CO<sub>2</sub> im Jahr emittiert.

Der Primärenergieverbrauch der ehemaligen DDR betrug im Jahr 1987 rund 3,7 Exajoule. Dies entspricht rund 125 Millionen Tonnen Steinkohleeinheiten. Die fossilen Energien hatten daran einen Anteil von rund 96 Prozent. Die ehemalige DDR emittierte im Jahr

Tabelle 3

**Energiebedingte CO<sub>2</sub>-Emissionen, Anteile an den weltweiten CO<sub>2</sub>-Emissionen und CO<sub>2</sub>-Emissionen pro Kopf für das Jahr 1986 für die größten Emittenten<sup>1)</sup>**

Land	CO <sub>2</sub> -Emissionen aus dem Energiebereich, in Mio. t	Anteil an den weltweiten energiebedingten CO <sub>2</sub> -Emissionen, in %	spezifische CO <sub>2</sub> -Emissionen aus dem Energiebereich, in t pro Kopf
1. USA .....	4 766	23,8	19,7
2. UdSSR .....	3737	18,6	13,2
3. VR China .....	2 030	10,1	1,9
4. Bundesrepublik Deutschland (einschließlich der ehemaligen DDR) .....	1 067	5,3	13,7
davon:			
– Bundesrepublik Deutschland <sup>2)</sup> (ohne ehem. DDR) .....	715	3,6	11,7
– ehemalige DDR .....	352	1,8	21,2
5. Japan .....	914	4,6	7,5
6. Großbritannien .....	676	3,4	11,9
7. Indien .....	539	2,7	0,7
8. Polen .....	478	2,4	12,7
9. Kanada .....	436	2,2	17,0
10. Frankreich/Monaco .....	384	1,9	6,9
11. Italien/San Marino .....	365	1,8	6,4
12. Südafrika .....	293	1,5	7,7
13. Mexiko .....	266	1,3	3,3
14. Australien .....	245	1,2	15,2
15. Tschechoslowakei .....	244	1,2	15,7
16. Rumänien .....	212	1,1	9,2
17. Niederlande .....	203	1,0	13,9
18. Spanien .....	189	0,9	4,9
19. Brasilien .....	175	0,9	1,3
20. Korea (Süd) .....	162	0,8	3,9
21. Korea (Nord) .....	156	0,8	7,5

Land	CO <sub>2</sub> -Emissionen aus dem Energiebereich, in Mio. t	Anteil an den weltweiten energiebedingten CO <sub>2</sub> -Emissionen, in %	spezifische CO <sub>2</sub> -Emissionen aus dem Energiebereich, in t pro Kopf
22. Jugoslawien	128	0,6	5,5
23. Bulgarien	122	0,6	13,6
24. Türkei	118	0,6	2,3
25. Belgien	112	0,6	11,3
26. Venezuela	106	0,5	6,0
27. Iran	105	0,5	2,4
28. Saudi Arabien	101	0,5	7,4
29. Argentinien	99	0,5	3,2
30. Indonesien	98	0,5	0,6
31. Ungarn	83	0,4	7,8
32. Dänemark	67	0,3	13,0
33. Ägypten	66	0,3	1,3
34. Griechenland	58	0,3	5,8
35. Österreich	55	0,3	7,2
36. Schweden	55	0,3	6,5
37. Finnland	53	0,3	10,8
38. Algerien	52	0,3	2,3
39. Thailand	49	0,2	0,9
40. Pakistan	47	0,2	0,5
41. Kolumbien	45	0,2	1,5
42. Schweiz/Liechtenstein	42	0,2	6,4
43. Nigeria	34	0,2	0,3
44. Malaysia	33	0,2	2,1
45. Kuba	32	0,2	3,1
46. Norwegen	31	0,2	7,5
47. Irland	30	0,2	8,4
48. Philippinen	28	0,1	0,5
49. Portugal	27	0,1	2,7
72. Luxemburg	9	0,1	24,6
Zwischensumme:	19 422	96,8	
davon EG (ohne ehemalige DDR)	2 835	14,1	8,8 im Durchschnitt
davon EG (einschl. ehem. DDR)	3 187	15,9	9,4 im Durchschnitt
weltweite Emissionen	20 055	100	4,1 im Durchschnitt

1) nach: Umweltbundesamt auf der Basis: Energy Statistics Yearbook, UN, New York 1988 mit Daten des Jahres 1986; Energy Balances of OECD Countries 1985/1986, Paris 1986; World Energy Statistics and Balances 1971-1987, OECD, Paris 1989. Die UN-Daten lagen für das Jahr 1987 noch nicht vor, so daß hier die Werte des Jahres 1986 verwendet wurden. Die Emissionen umfassen nicht den nichtenergetischen Energieverbrauch, dem damit keine Emissionen zugeordnet wurden. Die Werte erfassen ferner nicht die energiebedingten Emissionen der weiteren klimarelevanten Spurengase, die, in CO<sub>2</sub>-Äquivalenzen umgerechnet, zu den CO<sub>2</sub>-Emissionen addiert werden müßten, um die gesamten Emissionen aus dem Energiebereich, nach Ländern gegliedert, zu erhalten. Die internationalen und nationalen Statistiken differieren, so daß eine Ungenauigkeit für den weltweiten Wert in der Größenordnung von +/- 10 Prozent, für einzelne Länder möglicherweise in noch größerem Umfang, anzunehmen ist. Daraus ergibt sich u. a. die Notwendigkeit, diese Werte in Zukunft exakter und schneller zu erfassen. Die ausführliche Tabelle ist in Abschnitt F (1. Kapitel, Tabelle 1) enthalten.

2) Der Wert von 715 Mio. t CO<sub>2</sub>-Emissionen für die Bundesrepublik Deutschland im Jahr 1987 wurde im Rahmen des Studienprogramms für die Enquete-Kommission ermittelt und aus Konsistenzgründen auch in dieser Tabelle verwendet. Die o.g. internationalen Statistiken weisen für die energiebedingten CO<sub>2</sub>-Emissionen (ohne nichtenergetischen Verbrauch) der Bundesrepublik Deutschland für das Jahr 1986 754 Mio. t aus, was rund 3,7 Prozent des weltweiten Wertes entspricht.

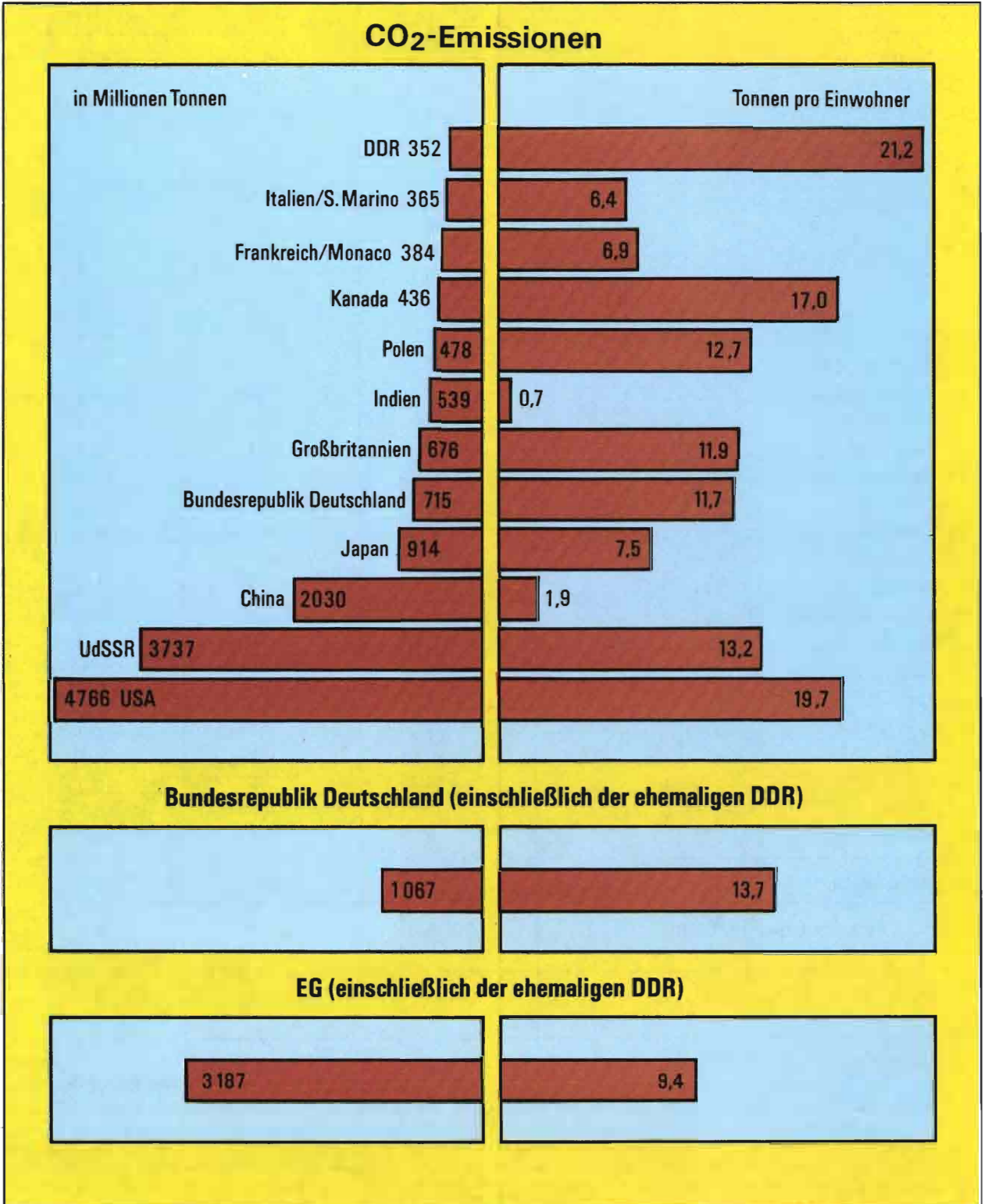


Abb. 4: Energiebedingte CO<sub>2</sub>-Emissionen der größten Emittenten und Emissionen pro Kopf im Jahr 1986 in Millionen Tonnen (Mio. t) bzw. in Tonnen (t) CO<sub>2</sub> per capita (Quelle: vgl. Tab. 3)

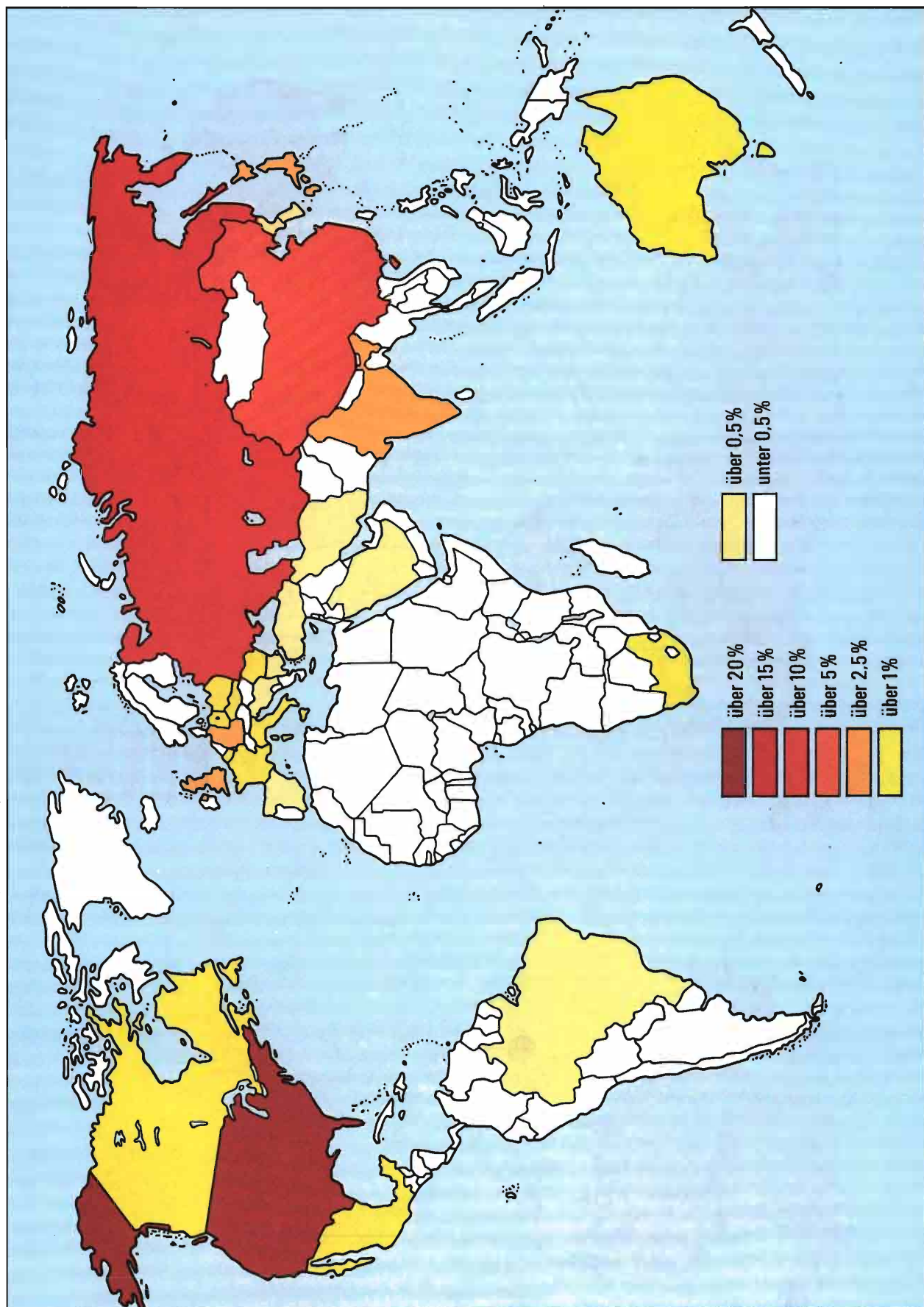


Abb. 5: Prozentualer Anteil einzelner Staaten an den weltweiten energiebedingten Kohlendioxidemissionen im Jahr 1986 (Quelle: vgl. Tab. 3)

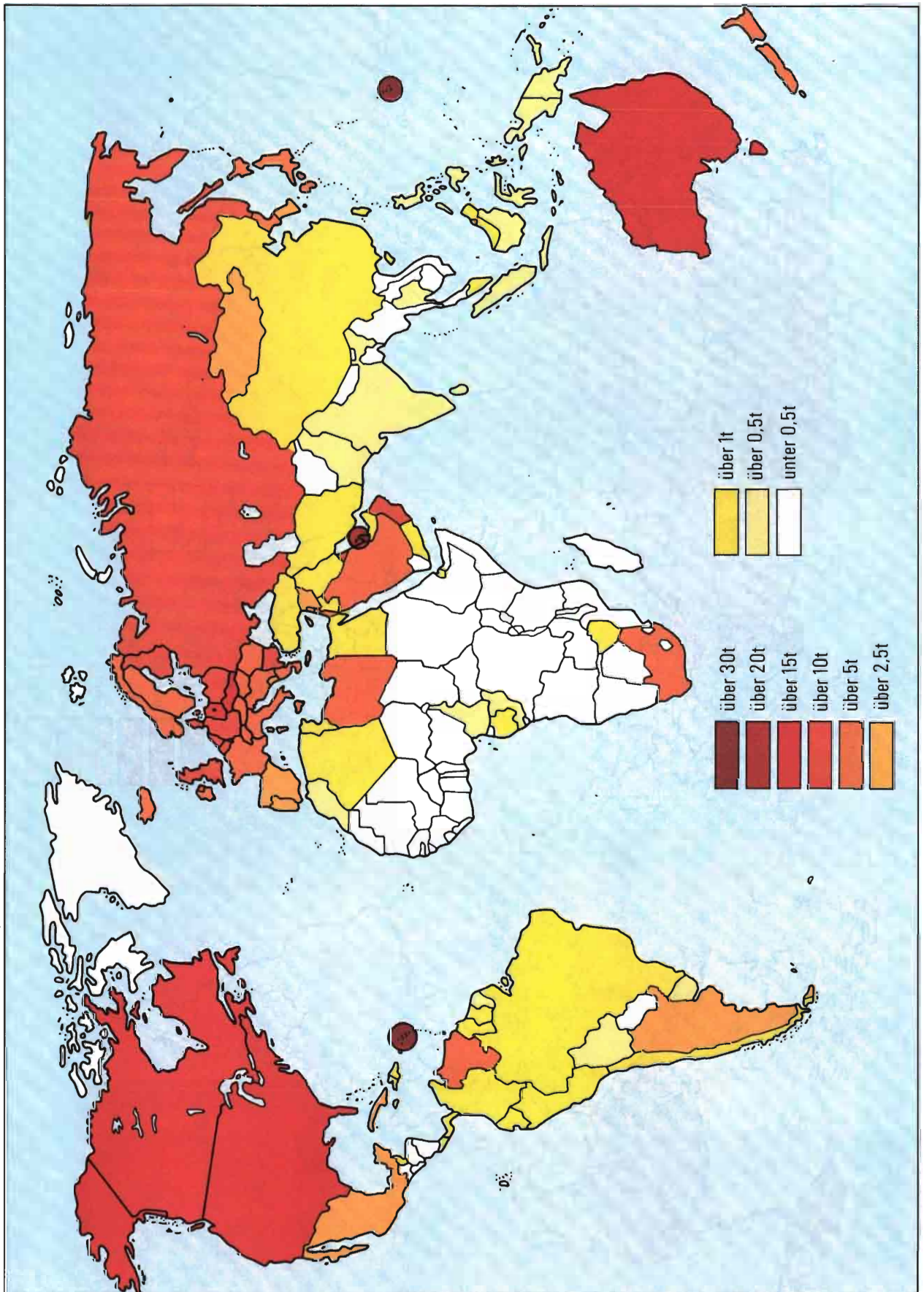


Abb. 6: Pro-Kopf-Emissionen einzelner Staaten in bezug auf die im Jahr 1986 pro Einwohner emittierten Tonnen energiebedingter Kohlendioxidemissionen (Quelle: vgl. Tab. 3)

1987 rund 350 Millionen Tonnen CO<sub>2</sub> (vorläufiger Wert), was etwa 1,7 Prozent der weltweit aus dem kommerziellen Energiebereich freigesetzten Menge entspricht. Pro Einwohner und Jahr wurden von der ehemaligen DDR rund 21,2 Tonnen CO<sub>2</sub> emittiert. Dies ist eine der höchsten Pro-Kopf-Emissionswerte im weltweiten Vergleich.

Die Bundesrepublik Deutschland und die ehemalige DDR emittierten im Jahr 1987 zusammen rund 1 065 Millionen Tonnen CO<sub>2</sub>, trugen damit insgesamt mit einem Anteil von rund 5,3 Prozent zu den weltweiten energiebedingten CO<sub>2</sub>-Emissionen bei und emittierten rund 13,7 t CO<sub>2</sub> pro Person. Die Bundesrepublik Deutschland einschließlich der ehemaligen DDR standen daher im Jahr 1986 nach den USA mit rund 23,8 Prozent, der UdSSR mit rund 18,6 Prozent und der Volksrepublik China mit rund 10,1 Prozent an vierter Stelle der Rangfolge der CO<sub>2</sub>-Emittenten.

Diese Zahlen und die weiteren energiebedingten Schadstoffemissionen (Stickoxide, Methan, Kohlenmonoxid, flüchtige organische Verbindungen (außer Methan) etc.) belegen die große Bedeutung des Energiebereichs für die Volkswirtschaften. Sie verdeutlichen, daß in diesem mit rund 50 Prozent Anteil zum zusätzlichen Treibhauseffekt beitragenden Bereich vielschichtige und abgestimmte Reduktionsstrategien entwickelt werden müssen.

Die Reduktion der energiebedingten klimarelevanten Spurengasemissionen stellt Politik, Wirtschaft und Verbraucher vor außerordentlich schwierige Aufgaben wegen

- der hohen Komplexität und Vielschichtigkeit der Energieproblematik,
- des Anteils der fossilen Energieträger von knapp 90 Prozent am kommerziellen weltweiten Primärenergieaufkommen sowie
- der langen Zeiträume, die auch nach unverzüglich eingeleiteten Maßnahmen vergehen, bis eine Wirkung eintritt.

### **3. FCKW und andere Verbindungen, die sowohl den Ozonabbau in der Stratosphäre bewirken als auch zum zusätzlichen Treibhauseffekt beitragen**

Die Veränderung der Ozonschicht in der Stratosphäre über der Antarktis während der Monate September/Oktober gehört zu den gravierendsten Störungen der chemischen Zusammensetzung der Erdatmosphäre, die bisher beobachtet wurden. Dieses als sogenanntes Ozonloch bekannte Phänomen hat sich seit seinem ersten Auftreten Anfang der siebziger Jahre mit einer quasi-zweijährigen Periodizität von Jahr zu Jahr verstärkt. Zur Zeit der maximalen Ausdehnung des Ozonlochs in den bisher extremsten Jahren 1987 und 1989 war deutlich mehr als die Hälfte des Ozons in einer senkrechten Säule vom Erdboden aus (Ozongesamtsäule) zerstört; die Verluste in bestimmten Höhen zwischen 15 und 20 km betragen dort mehr als 90 Prozent (vgl. im einzelnen Abschnitt D).

Die Ursache dieser besorgniserregenden Entwicklung ist die Zunahme der Emissionen von anthropogenen Fluorchlorkohlenwasserstoffen (FCKW). In den Wintermonaten werden in der antarktischen Stratosphäre chlorhaltige Spurengase aufgrund der speziellen meteorologischen Bedingungen durch Reaktionen an Eis- und Eis/HNO<sub>3</sub>(Salpetersäure)-Teilchen derart aktiviert, daß im Licht der Frühjahrs Sonne eine Verstärkung des anthropogenen Ozonabbaus einsetzt.

Die Stratosphäre über dem Nordpol zeigt während des Winters ähnliche Aktivierungsprozesse und chemische Störungen wie über dem Südpol; wegen der anderen meteorologischen Bedingungen ist es aber bisher nicht zu ähnlich starken Ozonverlusten wie über dem Südpol gekommen. Es wurden aber während bestimmter Meßkampagnen lokal und zeitlich begrenzte Ozonabnahmen beobachtet. Die Mechanismen dieser Ozonänderung sind nicht vollständig geklärt; vermutlich spielt aber die Dynamik der Atmosphäre ebenso eine Rolle wie die chemische Störung.

Eine neuere Auswertung von Meßflügen aus dem Jahr 1989 über der Arktis bestätigte, daß die Ozonwerte in großen Gebieten um bis zu 17 Prozent verringert waren. Diese Abnahme wird auf chemische Prozesse zurückgeführt.

In der globalen Stratosphäre außerhalb der Polarbereiche hat die Ozonkonzentration weniger gravierend, aber doch auch merklich abgenommen. Im Breitenband von 30 bis 64 °N, für das aufgrund der Verteilung der Meßstationen die meisten und längsten Meßreihen vorliegen und für das die genaueste Analyse durchgeführt werden konnte, betragen die Ozonverluste seit 1970 etwa 2 Prozent in den Jahresmittelkonzentrationen. Bei Mittelung allein über die Wintermonate waren die Verluste aber erheblich stärker und betragen bis zu 5,4 Prozent bei 55 °N. Es ist nicht auszuschließen, daß die Verluste in noch höheren Breiten noch größer sind.

In der Südhemisphäre sind die Ozonverluste zusätzlich durch den „Auffülleffekt“ des Ozonlochs geprägt und deshalb höher als in der Nordhemisphäre. Sie betragen bis zu 10 Prozent (im Breitenband 53–65 °S) allein im Zeitraum 1978 bis 1987.

Die beobachteten Ozonänderungen in der globalen Stratosphäre können nicht durch bekannte natürliche Phänomene erklärt werden. Ähnlich wie in der antarktischen Stratosphäre müssen die Ozonabnahmen auch hier auf die Zunahme der anthropogenen Spurengase, insbesondere der FCKW, zurückgeführt werden.

Die Ozonabnahmen ziehen gravierende Folgen nach sich: Ozon in der Stratosphäre wirkt als natürlicher Filter für den biologisch effektiven UV-B-Anteil der Sonneneinstrahlung im Wellenlängenbereich von 290 bis 325 Nanometer. Als Folge des Ozonabbaus ist mit einer Erhöhung der UV-B-Einstrahlung zu rechnen.

Eine Erhöhung der UV-B-Strahlung hätte Konsequenzen für Menschen, Tiere, Landpflanzen und für die Lebensgemeinschaften in den Ozeanen. Erwartet werden:

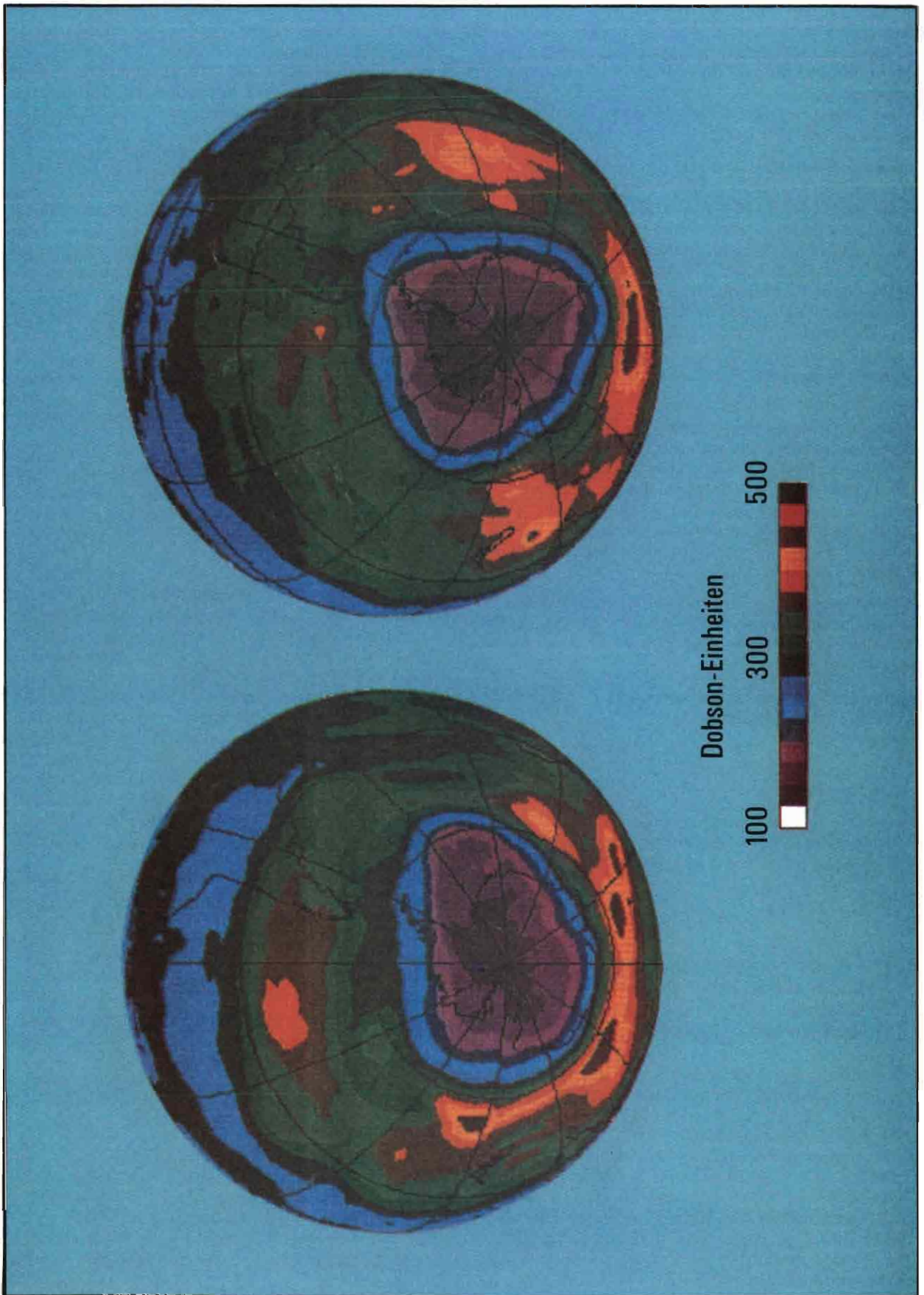
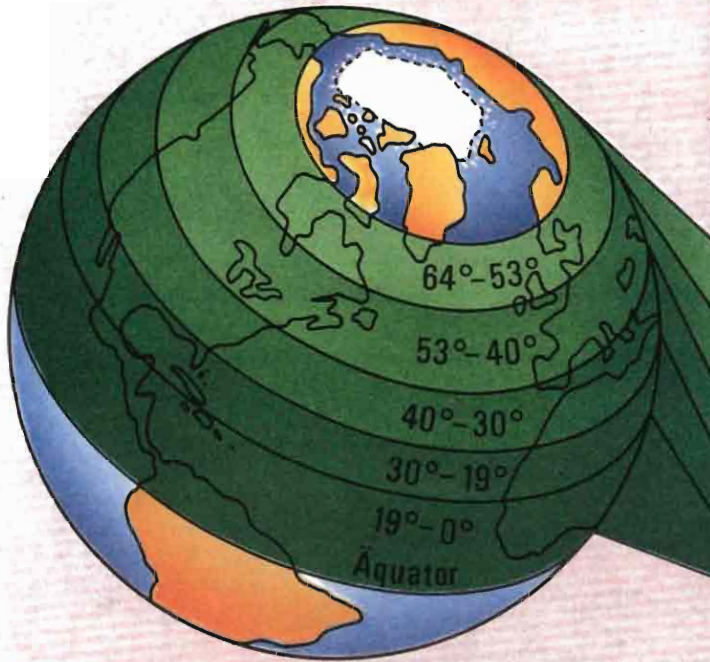


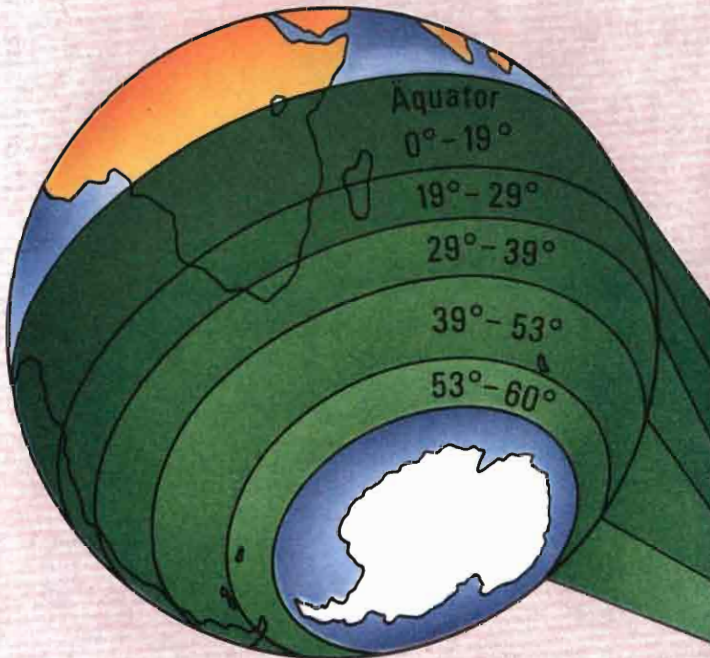
Abb. 7: Satellitenaufnahmen des Ozonlochs über der Antarktis am 3. Oktober 1987 und 1989



### Nordhemisphäre



Durchschnittliche Ozonabnahme Änderung in %		
Global	Winter	Sommer
- 2,3	- 6,2	+ 0,4
- 3,0	- 4,7	- 2,1
- 1,7	- 2,3	- 1,9
- 3,1		
- 1,6		



Durchschnittliche Ozonabnahme Änderung in %
- 2,1
- 2,6
- 2,7
- 4,9
- 10,6

### Südhemisphäre

Abb. 8: Veränderungen der Gesamtozonmenge in verschiedenen geographischen Regionen

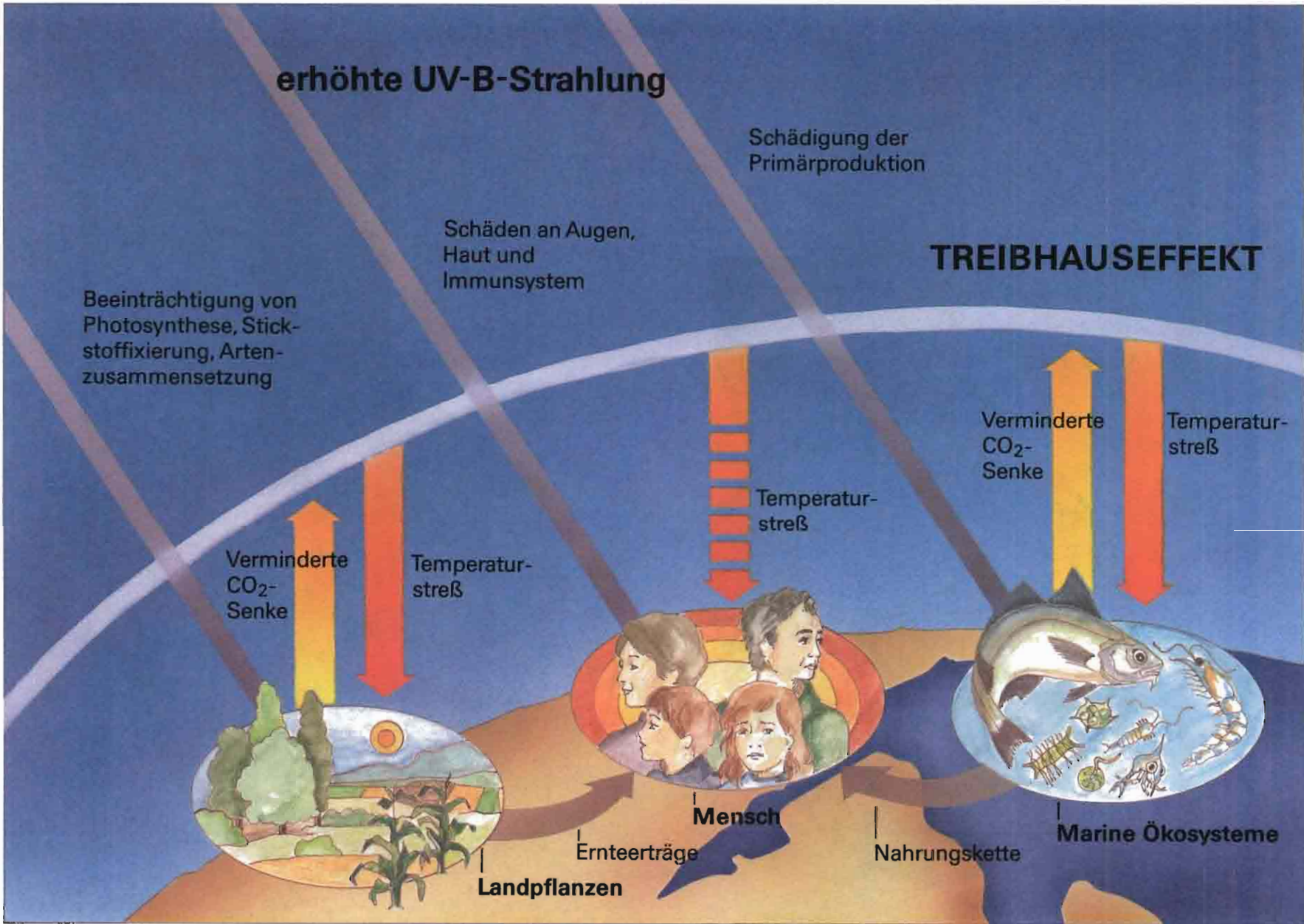


Abb. 9: Rückkopplungen zwischen erhöhter UV-B-Strahlung und Treibhauseffekt-Auswirkungen auf die Biosphäre

- eine Zunahme von Hauterkrankungen, insbesondere des Hautkrebses, sowie Schädigungen an Auge und Immunsystem;
- eine Verminderung der Photosyntheserate sowie die Veränderung verschiedener physiologischer Parameter der terrestrischen Atmosphäre, verbunden mit einem Rückgang der Ernteerträge;
- eine Beeinflussung der Dichte des marinen Planktons, möglicherweise verbunden mit einer Änderung der Primärproduktion des Phytoplanktons sowie Konsequenzen für die gesamte Nahrungskette in den Weltmeeren.

Zur Eindämmung des zusätzlichen Treibhauseffektes und zur Rettung der Ozonschicht in der Stratosphäre sind national und international durch das Wiener Übereinkommen, das Montrealer Protokoll und vor allem durch dessen Verschärfung auf der zweiten Vertragsstaatenkonferenz im Juni 1990 in London Maßnahmen zum Schutz der Erdatmosphäre veranlaßt worden. Der in London beschlossene weltweite Ausstieg aus Produktion und Verbrauch aller vollhalogenierten FCKW, der Halone sowie der Verbindung Tetrachlorkohlenstoff spätestens zum Jahr 2000 und der Verbindung Methylchloroform spätestens zum Jahr 2005 liefert den in diesem Zeitraum größten Beitrag zur Reduktion der klimarelevanten Spurengase. Allein durch diesen Beschluß sind – neben dem Schutz der Ozonschicht der Stratosphäre – rund 20 Prozent des Problems „zusätzlicher Treibhauseffekt“, ausgehend von der heutigen Situation und soweit diese Substanzen nicht durch andere klimawirksame Stoffe ersetzt werden, einer Lösung zugeführt. Wegen der langen Lebensdauer ozonschädigender Stoffe wird sich dies jedoch erst in vielen Jahrzehnten merklich auswirken.

#### 4. Vernichtung der tropischen Wälder\*)

Die Vernichtung der tropischen Wälder trägt mit einem Anteil von etwa 15 Prozent zum zusätzlichen Treibhauseffekt durch Emissionen von Kohlendioxid (rund 10 Prozent) sowie weiteren klimarelevanten Spurengasen (rund 5 Prozent), insbesondere von

Distickstoffoxid (Lachgas,  $N_2O$ ), Methan und Kohlenmonoxid, und damit zu globalen Klimaänderungen und deren Folgen bei.

Eine spezifische Bedeutung erhält die Vernichtung der tropischen Wälder dadurch, daß sie besonders gravierende soziale, ökologische und wirtschaftliche Konsequenzen nach sich zieht. Diese treffen vor allen Dingen die Tropenwäldländer und die Menschen vor Ort besonders hart; in einigen Bereichen – bei grenzüberschreitenden Auswirkungen – aber auch die internationale Staatengemeinschaft.

Die großflächige Waldvernichtung führt zu

- Störungen des regionalen Klimas, die sich in erster Linie durch Temperaturerhöhungen vor Ort um 2 bis 5 °C, geringere Niederschläge, damit häufigere Dürreperioden, insbesondere eine Verlängerung der Trockenzeit, Bodenerosionen und damit Verlust land- und forstwirtschaftlicher Nutzflächen bemerkbar machen;
- einem bedrohlichen Rückgang der Arten, von denen nach Schätzungen 50 bis 75 Prozent, möglicherweise sogar 90 Prozent, in den tropischen Feuchtwaldgebieten beheimatet sind, und somit zum unwiderruflichen Verlust unschätzbbarer genetischer Ressourcen;
- der Zerstörung von Lebens- und Kulturraum einheimischer Bevölkerungen und damit zur Verdrängung ökologisch angepaßter Landnutzungen.

Heute ist von dem ursprünglichen Bestand der tropischen Wälder weniger als die Hälfte übrig geblieben, und jedes Jahr werden gegenwärtig weitere 160 000 bis 200 000 km<sup>2</sup> zerstört.

Bei einer Fortführung dieser Vernichtung werden – ausgehend von rund 18 Millionen km<sup>2</sup> im Jahr 1990 – im Jahr 2000 schätzungsweise nur noch 15 Millionen km<sup>2</sup> und im Jahr 2050 lediglich 6 Millionen km<sup>2</sup> an Tropenwäldern vorhanden sein.

Dies würde für zahlreiche Tropenwäldländer den nahezu vollständigen Verlust ihrer wertvollen Waldressourcen mit allen Nutz- und Schutzfunktionen bedeuten.

## 2. KAPITEL

### Bisherige Arbeit der Enquete-Kommission im Überblick

Die Enquete-Kommission „Vorsorge zum Schutz der Erdatmosphäre“ wurde am 3. Dezember 1987 vom Präsidenten des Deutschen Bundestages konstituiert. Ihr gehören elf Mitglieder des Bundestages und elf

wissenschaftliche Sachverständige an. Der Deutsche Bundestag stellte der Kommission ein Sekretariat zur Verfügung.

Die Kommission hat den Auftrag, vornehmlich folgende Themenfelder zu bearbeiten:

\*) Eine ausführliche Problemdarstellung mit weitreichenden Maßnahmenvorschlägen hat die Enquete-Kommission im Mai 1990 mit dem 2. Bericht „Schutz der tropischen Wälder“ vorgelegt.

- Ozonabbau in der Stratosphäre und Reduktion der FCKW sowie anderer ozonzerstörender Substanzen;

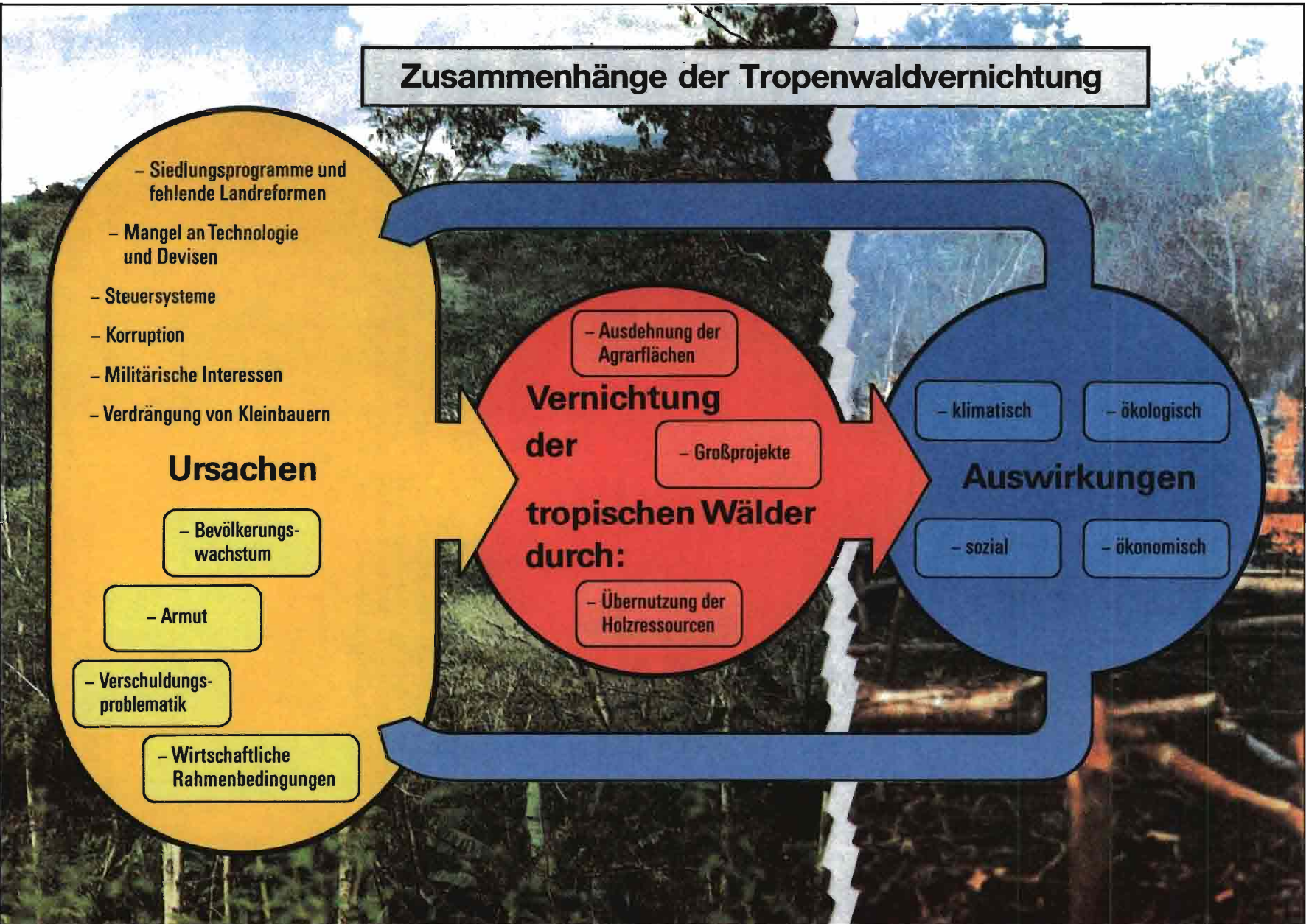


Abb. 10: Zusammenhänge der Tropenwaldvernichtung

- Treibhauseffekt, Klimaänderungen und Maßnahmen zur Eindämmung des anthropogenen, zusätzlichen Treibhauseffektes, insbesondere durch die Reduktion energiebedingter klimarelevanter Spurengasemissionen;
- Vernichtung der tropischen Wälder und Maßnahmen zu ihrem Schutz.

### 1. Erster Bericht

Der erste Bericht der Enquete-Kommission, der dem Deutschen Bundestag im November 1988 übergeben wurde<sup>1)</sup>, stellt den wissenschaftlichen Sachstand in den Bereichen Ozonabbau in der Stratosphäre sowie Treibhauseffekt und Klimaänderungen dar. Er enthält detaillierte Empfehlungen zur Reduktion der FCKW und anderer ozonzerstörender Substanzen sowie erste Empfehlungen zur Eindämmung des Treibhauseffektes, insbesondere zur Reduktion energiebedingter klimarelevanter Spurengase.

### 2. Zweiter Bericht

Der zweite Bericht der Enquete-Kommission vom Mai 1990<sup>2)</sup> behandelt umfassend den Themenkomplex „Zerstörung der tropischen Wälder“ und enthält ein weitreichendes Maßnahmenkonzept, mit dessen Umsetzung sofort begonnen und durch das so schnell und weitreichend wie möglich der Schutz der Wälder gewährleistet werden soll. Insbesondere enthält der Bericht Empfehlungen für ein Sofortprogramm und eine Internationale Konvention zum Schutz der tropischen Wälder. Außerdem wird die Gründung eines Internationalen Treuhandfonds vorgeschlagen. Der Bericht wird ergänzt um eine zusammenfassende Darstellung der Situation der Wälder außerhalb der Tropen.

<sup>1)</sup> Der erste Bericht der Kommission erschien als Bundestagsdrucksache 11/3246 und als Band 5/88 der Reihe „Zur Sache – Themen parlamentarischer Beratung“ unter dem Titel „Schutz der Erdatmosphäre – Eine internationale Herausforderung“. Die erste und die zweite Auflage sind inzwischen vergriffen. Eine dritte, erweiterte Auflage ist seit Sommer 1990 im Buchhandel erhältlich. (Economica Verlag, Bonn, und Verlag C.F. Müller, Karlsruhe). Eine englische Übersetzung des Berichtes ist im Dezember 1989 unter dem Titel „Protecting the Earth's Atmosphere – An International Challenge“ erschienen und im Referat Öffentlichkeitsarbeit des Deutschen Bundestages erhältlich. Kurzfassungen des Berichtes sind im französischen, spanischen, und portugiesischen Ausgaben erhältlich.

<sup>2)</sup> Der zweite Bericht der Kommission erschien im Mai 1990 als Bundestagsdrucksache 11/7220. Er ist im September 1990 in der Reihe „Zur Sache – Themen parlamentarischer Beratung“ als Band 10/90 unter dem Titel „Schutz der tropischen Wälder“ erschienen und ist ebenfalls im Buchhandel erhältlich (Economica Verlag, Bonn, und Verlag C.F. Müller, Karlsruhe). Eine englische Ausgabe erscheint im Herbst 1990 unter dem Titel „Protecting the Tropical Forests – A High-Priority International Task“.

### 3. Dritter Bericht

Der hier vorliegende dritte Bericht der Enquete-Kommission<sup>3)</sup> gibt den aktualisierten wissenschaftlichen Sachstand zu den Bereichen Treibhauseffekt, Klimaänderungen und deren Folgen (vgl. Abschnitt C) sowie Abbau der Ozonschicht der Stratosphäre (vgl. Abschnitt D) wieder. Hierzu führte die Kommission im Frühjahr 1990 öffentliche, international besetzte Anhörungen durch.

Der dritte Bericht analysiert ferner schwerpunktmäßig die Handlungsmöglichkeiten zur Reduktion der Emissionen von Kohlendioxid (CO<sub>2</sub>) und anderen energiebedingten klimarelevanten Spurengasen (vgl. Abschnitt E) sowie die Ausgestaltung einer Internationalen Konvention über Klima und Energie (vgl. Abschnitt F).

Um geeignete Handlungsmöglichkeiten und Empfehlungen zu erarbeiten, hat die Kommission im Jahr 1989 ein umfangreiches Studienprogramm zum Thema „Internationale Konvention zum Schutz der Erdatmosphäre sowie Vermeidung und Reduktion energiebedingter klimarelevanter Spurengase“ in Auftrag gegeben. Im Rahmen dieses Studienprogramms wurden innerhalb etwa eines Jahres rund 150 Studien von 50 wissenschaftlichen Instituten angefertigt<sup>4)</sup>. Zusätzlich wurde eine auf den Ergebnissen des Studienprogramms aufbauende, zusammenfassende Energiestudie über Reduktionsziele und systematische Analysen der Potentiale zur Verringerung der Emission der energiebedingten klimarelevanten Spurengase für die Bundesrepublik Deutschland vergeben (vgl. Abschnitt E).

Da die Studien bereits im Frühjahr 1989 von der Kommission beschlossen worden waren, bezogen sie die Analyse der Reduktionsmöglichkeiten in der ehemaligen DDR nicht mit ein, so daß die Kommission Aussagen zu Reduktionsmöglichkeiten dort nicht mit gleichem Detaillierungsgrad wie für das Gebiet der Bundesrepublik Deutschland vor dem Beitritt der DDR treffen kann.

Der dritte Bericht unterbreitet konkrete Vorschläge und Handlungsempfehlungen

- für eine internationale Gesamtstrategie zum Schutz der Erdatmosphäre (vgl. Abschnitt G),
  - für die Ausgestaltung einer Internationalen Konvention über Klima und Energie, das heißt zur Reduktion der Emissionen energiebedingter klimarelevanter Spurengase (vgl. Abschnitt F),
  - für die Reduktion dieser Spurengase in der EG (vgl. Abschnitt F)
- sowie

<sup>3)</sup> Der dritte Bericht erscheint ebenfalls in einer Verlagsausgabe (s.o.). Eine englische Übersetzung des Abschnittes A erscheint im Oktober 1990 und eine englische Ausgabe des gesamten dritten Berichtes wird voraussichtlich im Frühjahr 1991 veröffentlicht.

<sup>4)</sup> Die Studien erscheinen im Herbst 1990 in einer Gesamtausgabe unter dem Titel „Energie und Klima – Studienprogramm der Enquete-Kommission Vorsorge zum Schutz der Erdatmosphäre des Deutschen Bundestages“ und sind im Buchhandel erhältlich (Economica Verlag, Bonn, und Verlag C. F. Müller, Karlsruhe) (vgl. Abschnitt E, Kap. 6).

- für die Reduktion dieser Spurengase in der Bundesrepublik Deutschland (vgl. Abschnitt E).

Die Kommission hat den Anteil der Landwirtschaft am zusätzlichen Treibhauseffekt und die Folgen der Klimaänderungen für den Menschen (Welternährungslage, Landwirtschaft, Umweltflüchtlinge, Wanderbewegungen und andere) und die Ökosysteme (Verschiebung von Vegetationszonen und anderes) in dieser Wahlperiode infolge der Vielschichtigkeit und des

Umfangs der Gesamtproblematik nur im Überblick bearbeiten können (vgl. Abschnitt C, 3. Kapitel). Sie gibt daher für diesen Themenkomplex zum jetzigen Zeitpunkt ausschließlich allgemeine Empfehlungen.

Die Kommission legt in diesem dritten Bericht Handlungsempfehlungen vor, die auf den Empfehlungen des ersten und zweiten Berichtes aufbauen und diese fortführen, konkretisieren und um neue Maßnahmenvorschläge erweitern.

### 3. KAPITEL

## Internationale und EG-weite Handlungsempfehlungen zur Eindämmung des zusätzlichen Treibhauseffektes und zum Schutz der Erdatmosphäre

Die wissenschaftlichen Erkenntnisse über den Abbau der Ozonschicht in der Stratosphäre und deren Folgen, den zusätzlichen Treibhauseffekt und die dadurch ausgelösten Klimaänderungen und Folgewirkungen sowie die Rolle des Energiebereichs einschließlich des Verkehrs haben sich so weit verdichtet und sind in den wesentlichen Grundaussagen so eindeutig, daß sie keinen Zweifel daran lassen, daß – unabhängig von der Notwendigkeit weiterer Forschungen – unter Vorsorgegesichtspunkten sofort gehandelt werden muß. Dies betrifft – neben den bereits international begonnenen und noch zu intensivierenden Maßnahmen zur Reduktion der FCKW und weiterer ozonzerstörender Substanzen – insbesondere Maßnahmen zur Reduktion der energiebedingten klimarelevanten Spurengase und zum Schutz der tropischen Wälder.

Die Kommission fordert den Deutschen Bundestag und die Bundesregierung auf, als wirksamste Strategie mit dem Ziel einer wechselseitigen Verstärkung sowohl das bisherige internationale als auch das bisherige nationale Vorgehen zum Schutz der Erdatmosphäre erheblich auszuweiten, das heißt, sich insbesondere auf internationaler und EG-weiter Ebene für weitreichende Maßnahmen zur Reduktion der energiebedingten klimarelevanten Spurengasemissionen einzusetzen, entsprechende Maßnahmen anderer Länder im gebotenen Umfang zu unterstützen und auf nationaler Ebene weitreichende Maßnahmen in diesem Bereich durchzuführen.

Dabei ist darauf zu achten, daß Maßnahmen zum Schutz der Erdatmosphäre keine Verlagerung von Folgeschäden oder Risiken auf andere Bereiche nach sich ziehen. Stattdessen ist anzustreben, daß die zu treffenden Maßnahmen zur Reduktion der Emission klimarelevanter Spurengase auch weiteren Kriterien der Umwelt- und Sozialverträglichkeit genügen und sich das Risiko- und Schadenspotential insgesamt verringert.

Die Kommission hält in Anbetracht des gegenwärtigen Standes der Diskussion über mögliche internationale Vereinbarungen ein getrenntes Vorgehen in den einzelnen Problembereichen für sachgerecht und effizient, weil

- die Bereiche ozonzerstörende Stoffe, Klima und Energie sowie Schutz der tropischen Wälder durch

jeweils unterschiedliche Problemlagen gekennzeichnet sind, die nach differenzierten Bestandsaufnahmen und spezifischen Lösungsstrategien verlangen, und weil

- alle diese Bereiche Probleme aufwerfen, die weit über ihren Anteil am Entstehen des zusätzlichen Treibhauseffektes hinausgehen.

Dieses sektorale Vorgehen verspricht aus Sicht der Kommission die schnellsten Erfolge, wobei von Anfang an eine Gesamtkonzeption zum Schutz der Erdatmosphäre und zu einer ökologisch und ökonomisch dauerhaften Entwicklung mitbedacht werden muß, so daß die zu treffenden Vereinbarungen im Laufe des nächsten Jahrzehnts in eine Gesamtkonvention zum Schutz der Erdatmosphäre integriert werden können.

Die Kommission ist sich bewußt, daß auf internationaler Ebene zum Teil eine Verknüpfung der Maßnahmen im FCKW- und Energiebereich mit Maßnahmen zum Schutz der Wälder diskutiert wird. Sie hält jedoch zunächst ein sektorales Vorgehen für aussichtsreicher und begrüßt es daher, daß sich der Wirtschaftsgipfel in Houston sowohl für die Aushandlung eines Rahmenübereinkommens zur Klimaveränderung als auch für ein globales Übereinkommen oder eine globale Vereinbarung zum Schutz der Wälder ausgesprochen hat.

Die Kommission empfiehlt dem Deutschen Bundestag und der Bundesregierung, darauf hinzuwirken, daß im Rahmen einer Gesamtstrategie zur Eindämmung des zusätzlichen Treibhauseffektes und zum Schutz der Erdatmosphäre vordringlich die weltweit geeigneten Maßnahmen beschlossen und eingeleitet werden, die im folgenden näher erläutert werden.

### **1. Empfehlungen zur Reduktion der FCKW und anderer Verbindungen, die sowohl den Abbau der Ozonschicht der Stratosphäre bewirken als auch zum zusätzlichen Treibhauseffekt beitragen**

#### **1.1 Internationale Maßnahmen**

Die Enquete-Kommission ist der Auffassung, daß das Montrealer Protokoll auch nach der während der

zweiten Vertragsstaatenkonferenz im Juni 1990 in London beschlossenen Verschärfung in seiner gegenwärtigen Ausgestaltung nicht für einen umfassenden Schutz der Erdatmosphäre ausreicht.

Die Bundesregierung wird ersucht, sich im Rahmen einer im Jahr 1992 anzuberaumenden dritten Vertragsstaatenkonferenz – unter Berücksichtigung der dann vorliegenden oder geplanten Übereinkommen in anderen Regelungsbereichen zur Eindämmung des Treibhauseffektes – mit Nachdruck für eine Novellierung beziehungsweise sofortige Umsetzung bereits beschlossener Vereinbarungen des auf der zweiten Vertragsstaatenkonferenz in London überarbeiteten Montrealer Protokolls einzusetzen und folgende Ziele zu verfolgen:

- eine weltweite Einstellung von Verbrauch und Produktion aller vollhalogenierten FCKW, aller Halone sowie der Verbindungen Tetrachlorkohlenstoff und Methylchloroform spätestens bis zum Jahr 1997;
- den Einbezug der bisher im Montrealer Protokoll nicht geregelten teilhalogenierten FCKW (H-FCKW) mit dem Ziel, den Verbrauch und die Produktion dieser ebenfalls ozonschädigenden und klimarelevanten Verbindungen weltweit bis spätestens zum Jahr 2005 einzustellen;
- befristeter und begrenzter Einsatz der klimawirksamen FKW (Fluorkohlenwasserstoffe) nur dann, falls und solange nachweislich ein weder für Ozon noch für das Klima weniger schädlicher Ersatzstoff großtechnisch (befristeter Erlaubnisvorbehalt) noch eine Ersatztechnologie oder ein Ersatzverfahren verfügbar sind;
- Beseitigung der derzeit noch geltenden Ausnahmeregelungen für Entwicklungsländer; dies soll dadurch erreicht werden, daß die Industrieländer sicherstellen, daß Ersatzstoffe und -technologien auch in diesen Ländern zeitgleich wie in den Industrieländern zur Verfügung gestellt werden und die Mehrkosten, die den Entwicklungsländern bei der Einhaltung der Protokollregelungen entstehen, durch finanzielle Unterstützung durch die Industrieländer gedeckt werden;
- eine erhebliche Ausweitung des Finanzvolumens des auf der zweiten Vertragsstaatenkonferenz errichteten multilateralen Fonds zur Unterstützung der Entwicklungsländer auf 2 Milliarden DM. Die Mittel sollen dazu verwandt werden, den Technologietransfer von FCKW-freien Ersatzstoffen und Ersatztechniken zu finanzieren, die entsprechende Ausrüstung bereitzustellen und Expertisen für die Umstellung anzufertigen.
- Zur Erweiterung des Fonds und zum Anreiz für einen schnelleren Ausstieg aus Produktion und Verbrauch ozonschädlicher Stoffe die Einführung einer Abgabe für die Herstellung und den Verbrauch der FCKW, Halone und aller H-FCKW anzustreben; es wird vorgeschlagen, auf jedes produzierte Kilogramm FCKW und Halon eine Abgabe in Höhe von 10,— DM und für jedes Kilogramm teilhalogenerter H-FCKW eine Abgabe in Höhe von 5,— DM vorzusehen;

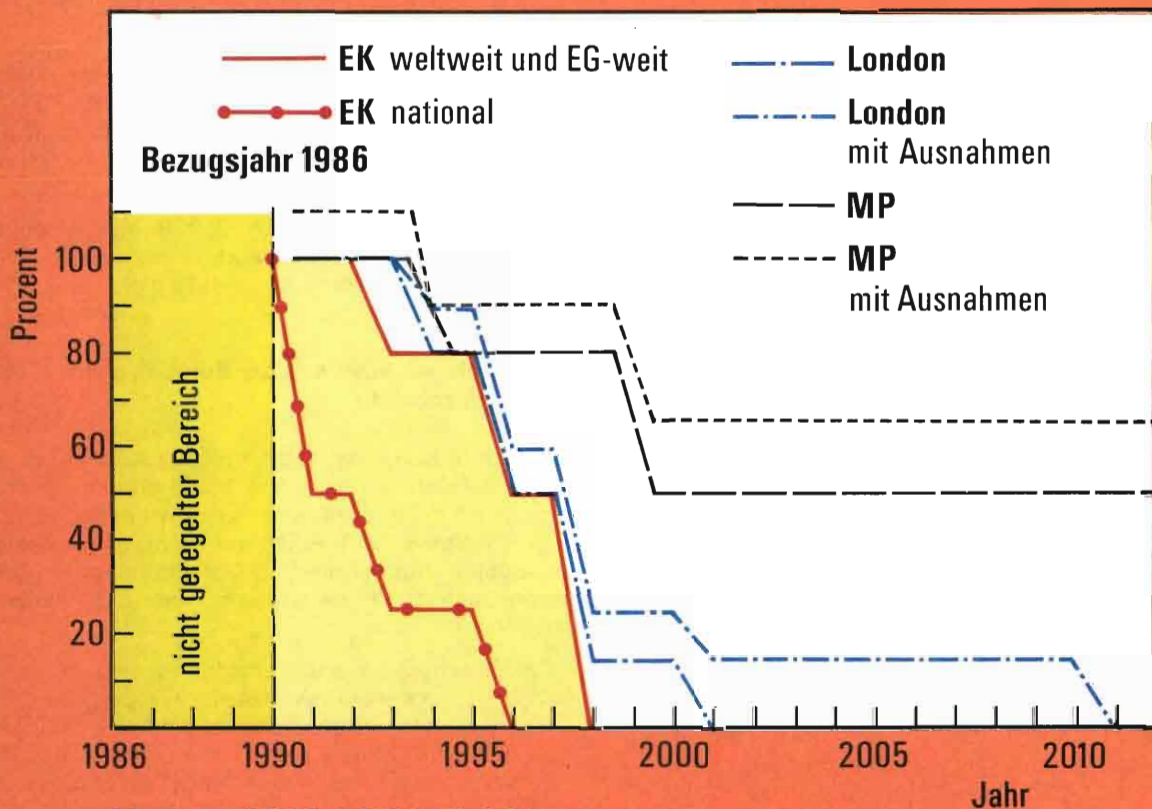
- Regelungen über eine staatliche Kontrolle der Produktions- und Verbrauchszahlen sowie über eine effektive, von der Öffentlichkeit nachvollziehbare Kontrolle der erzielten Reduktionsquoten festzulegen;
- Festlegung der im Montrealer Protokoll vorgesehenen Liste von Produkten, die mit ozonschädigenden Stoffen hergestellt worden sind und die gemäß den Regelungen des Montrealer Protokolls unter ein Importverbot fallen sollen;
- weltweite Kennzeichnung aller Roh-, Zwischen- und Endprodukte, die ozonschädigende Stoffe enthalten oder mit ihnen hergestellt wurden.

## 1.2 Maßnahmen innerhalb der Europäischen Gemeinschaften

Die Enquete-Kommission sieht es sowohl zum Schutz der Ozonschicht als auch zur Eindämmung des zusätzlichen Treibhauseffektes als notwendig an, daß die weltweit als erforderlich angesehenen Reduzierungsquoten innerhalb der EG unabhängig von den internationalen Vereinbarungen erreicht werden. Dies bedeutet, daß

- der Vorschlag für eine Verordnung des Rates über Stoffe, die zu einem Abbau der Ozonschicht führen, der unter anderem eine Produktions- und Verbrauchseinstellung aller FCKW bis zum Jahr 1997 vorsieht, umgehend verabschiedet und umgesetzt wird;
- in dem Verordnungsentwurf die Regelungen bezüglich der Halone und der Verbindungen Methylchloroform und Tetrachlorkohlenstoff weiter verschärft werden, sowie diese Stoffe von Ende des Jahres 1997 an nicht mehr produziert und verbraucht werden dürfen;
- die teilhalogenierten H-FCKW in die Verordnung aufgenommen werden, mit dem Ziel, den Verbrauch und die Produktion dieser ebenfalls ozonschädigenden und klimarelevanten Verbindungen innerhalb der EG bis spätestens zum Jahr 2005 einzustellen;
- die klimawirksamen FKW (Fluorkohlenwasserstoffe) befristet und begrenzt und nur dann eingesetzt werden dürfen, falls und solange nachweislich weder ein für Ozon und Klima weniger schädlicher Ersatzstoff großtechnisch (befristeter Erlaubnisvorbehalt) noch eine Ersatztechnologie oder ein Ersatzverfahren verfügbar sind;
- sich die EG in den Verhandlungen im Rahmen einer 1992 anzuberaumenden dritten Vertragsstaatenkonferenz zur Überprüfung des Montrealer Protokolls nachdrücklich für die von der Enquete-Kommission vorgeschlagenen internationalen Maßnahmen einsetzt;
- für den Fall, daß auf internationaler Ebene eine Verzögerung bei der Einführung der Abgabe für die Herstellung der FCKW und Halone in Höhe von 10,— DM pro Kilogramm und für alle H-FCKW in Höhe von 5,— DM pro Kilogramm eintritt, diese in der EG spätestens 1992 einzuführen ist und zu

### FCKW 11, 12, 113, 114, 115



### Halon 1211, 1301, 2402

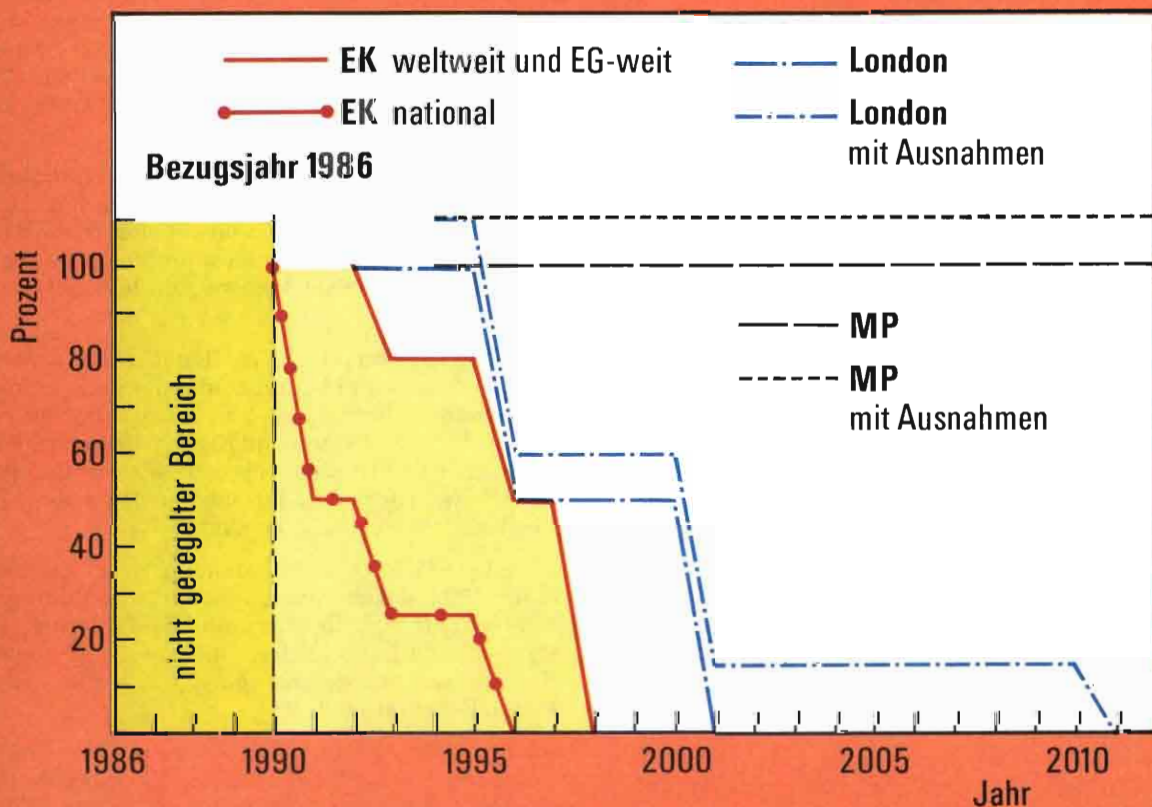
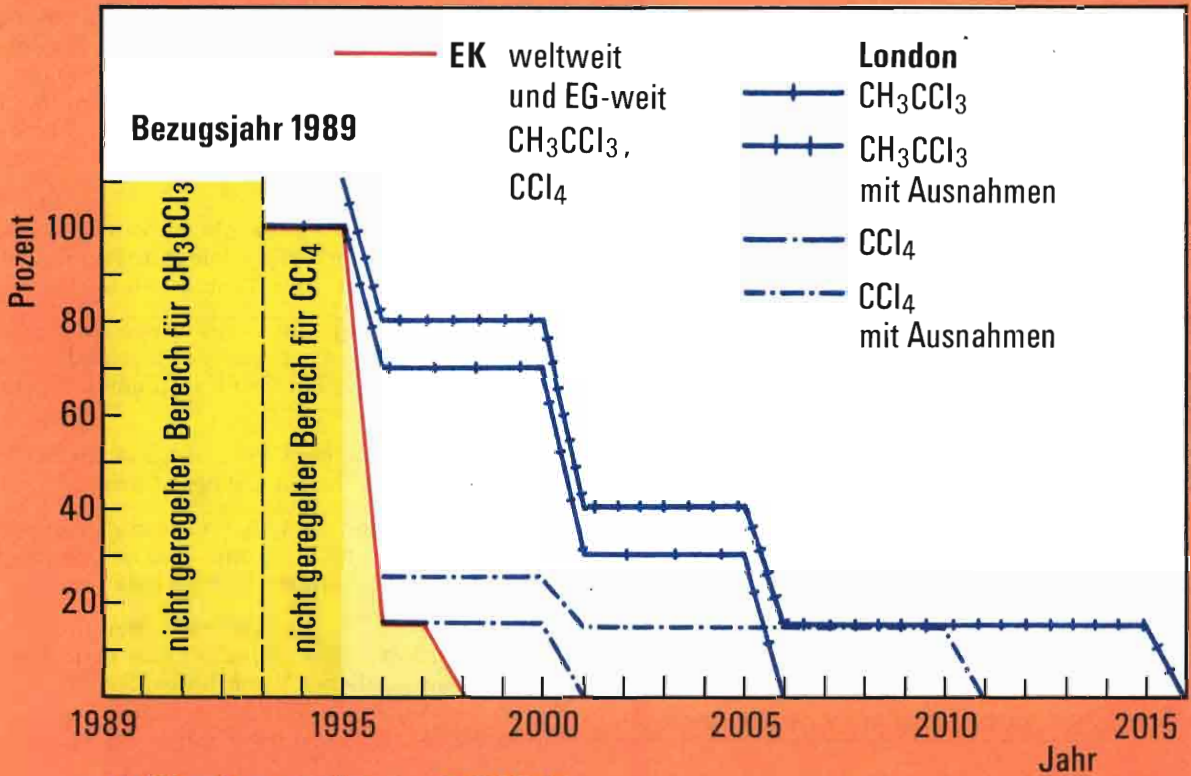


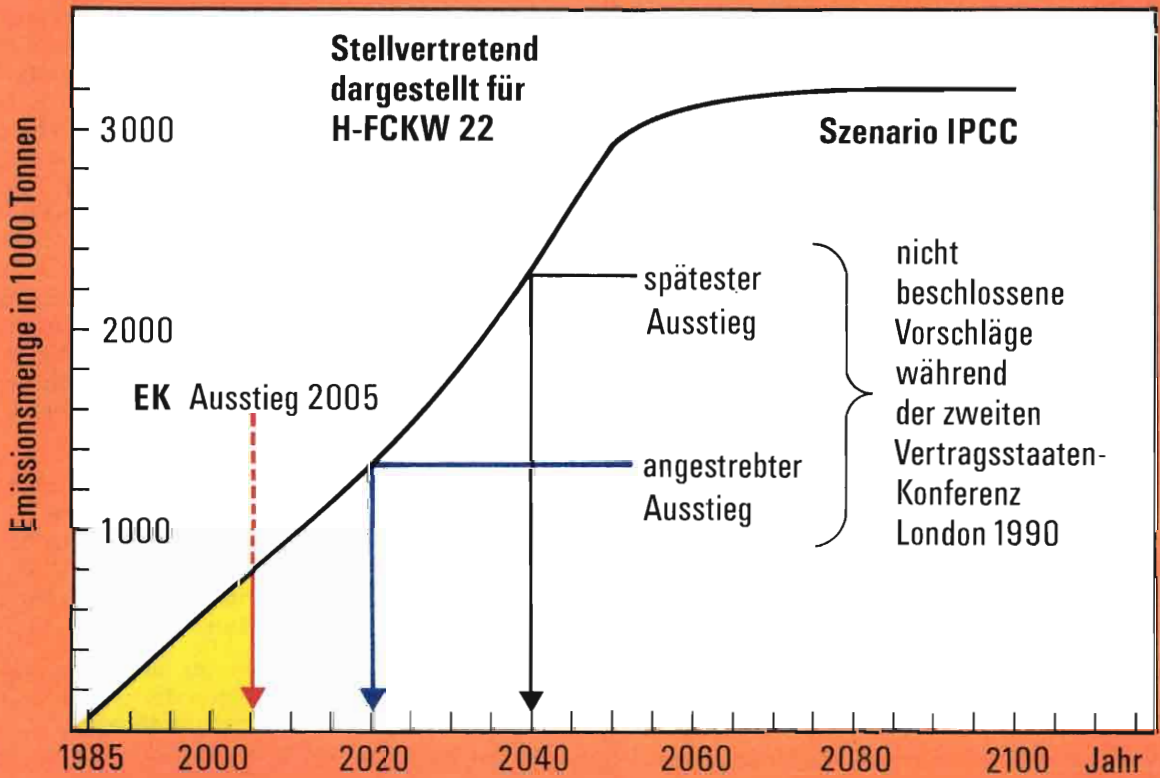
Abb. 11: Stufenplan der Enquete-Kommission zur weltweiten, EG-weiten und nationalen Reduktion der Fluorchlorkohlenwasserstoffe (FCKW), Halone sowie der Verbindungen Tetrachlorkohlenstoff (CCl<sub>4</sub>), Methylchloroform (CH<sub>3</sub>CCl<sub>3</sub>) und teilhalogenierter FCKW (vgl. Abschnitt D, 2. Kap., Nr. 3) im Vergleich zu den Regelungen des Montrealer Protokolls und den auf der zweiten Vertrags-



### Tetrachlorkohlenstoff (CCl<sub>4</sub>), Methylchloroform (CH<sub>3</sub>CCl<sub>3</sub>)



### teihalogenierte FCKW



staatenkonferenz in London getroffenen Vereinbarungen (vgl. Abschnitt D, 5. Kap., Nr. 1.1.2 und 1.1.3). Diese Verbindungen verursachen die Ozonzerstörung in der Stratosphäre und tragen zusätzlich zum anthropogenen Treibhauseffekt bei.

prüfen ist, ob Abgaben auch auf andere, in der Stratosphäre ozonzerstörende Stoffe auszudehnen sind;

- in der Verordnung ausdrücklich eine Regelung getroffen wird, durch die jeder EG-Mitgliedsstaat die Möglichkeit erhält, nationale Regelungen zu treffen, mit dem Ziel, die im Verordnungsentwurf vorgegebenen Quoten erheblich früher zu erreichen;
- eine Kennzeichnung aller in der EG hergestellten und verwendeten Roh-, Zwischen- und Endprodukte, die ozonschädigende Stoffe enthalten oder mit ihnen hergestellt wurden, eingeführt wird.

Der Ausstieg aus Produktion und Verbrauch der vorgenannten Verbindungen ist die wichtigste Maßnahme zum Schutz der Ozonschicht und die kurzfristig am effizientesten durchführbare Maßnahme zur Eindämmung des zusätzlichen Treibhauseffektes.

## **2. Empfehlungen zur Reduktion der Emissionen klimarelevanter Spurengase aus dem Energiebereich einschließlich dem Verkehrsbereich, insbesondere des Kohlendioxids, des Methans, der Stickoxide, des Kohlenmonoxids und der flüchtigen organischen Verbindungen (ohne Methan).**

Es zeichnet sich ab, daß die durch den zusätzlichen Treibhauseffekt aufgeworfenen Probleme so gravierend sind, daß die Struktur der Energieversorgung weltweit tiefgreifend verändert werden muß. Nur fundierte und wirksame Langfriststrategien können zur Lösung beitragen, wobei Wege zu ihrer Realisierung so früh wie möglich beschritten werden müssen.

### **2.1 Internationale Maßnahmen – Reduktionsziele und Internationale Konvention über Klima und Energie**

#### **2.1.1 Reduktionsziele**

Aufgrund des derzeit weltweit vorhandenen wissenschaftlichen Sachstandes empfiehlt die Kommission, die Kohlendioxid-Emissionen aus dem Energiebereich bis zum Jahr 2050 weltweit um mindestens 50 Prozent zu reduzieren. Bezogen auf den Stand des Jahres 1987 mit rund 20,5 Milliarden Tonnen entspricht dies einer absoluten Reduktion um 10,25 Milliarden Tonnen CO<sub>2</sub>. Dabei sind die Reduktionsanteile der verschiedenen Länder nach einem Schlüssel zu regeln, der alle relevanten Kriterien berücksichtigt (vgl. Nr. 2.2 und Abschnitt F, 2. Kapitel).

Eine Reduktion um 50 Prozent weltweit bis zum Jahr 2050 bedeutet, insbesondere unter Berücksichtigung der Belange der Entwicklungsländer, daß die weltweiten CO<sub>2</sub>-Emissionen bis zum Jahr 2020 um mindestens rund 15 Prozent, bezogen auf das Basisjahr 1987 – vermindert werden müssen. Wenn diese Reduktionsziele umgesetzt werden, werden im Jahr 2050 weltweit rund 10 Milliarden Tonnen CO<sub>2</sub> aus dem

Energiebereich emittiert, und damit wird die Pro-Kopf-Emission im Jahr 2050 bei einer angenommenen Weltbevölkerung von rund 10 Milliarden Einwohnern im Durchschnitt bei etwa einer Tonne CO<sub>2</sub> liegen.

Die Kommission erachtet diese ehrgeizigen Reduktionsziele für notwendig und fordert die Bundesregierung auf, mit allem Nachdruck an die internationale Staatengemeinschaft zu appellieren, tiefgreifende Maßnahmen und Anstrengungen zu unternehmen, damit diese langfristigen Reduktionsziele erreicht werden können.

Die Kommission empfiehlt deshalb, bis zum Jahr 2005 – bezogen auf das Jahr 1987 – folgende Reduktionsziele zu erreichen (vgl. Abb. 12 und Tab. 4):

- eine Verminderung der CO<sub>2</sub>-Emissionen in den wirtschaftsstarken westlichen Industrieländern mit derzeit besonders hohen Pro-Kopf-Emissionen um mindestens 30 Prozent;
- eine Verminderung der CO<sub>2</sub>-Emissionen in der EG um insgesamt mindestens 20 bis 25 Prozent;
- eine Verminderung der CO<sub>2</sub>-Emissionen in den Industrieländern (westliche und östliche Industrieländer zusammen) um mindestens 20 Prozent;
- den Anstieg der CO<sub>2</sub>-Emissionen in den Entwicklungsländern auf etwa 50 Prozent zu begrenzen, das heißt, die jährlichen Wachstumsraten der Emission zu vermindern, wobei differenzierte Werte für die einzelnen Entwicklungsländer ermittelt werden müssen.

Eine weitere Konkretisierung dieser Zielvorgaben, das heißt der exakten Reduktionsanteile der verschiedenen Länder und Ländergruppen auf der Basis eines Kriterienmixes mit entsprechender Gewichtung der einzelnen Kriterien (vgl. Nr. 2.2), erscheint gegenwärtig infolge fehlender fundierter Potentialabschätzungen nicht möglich. Deswegen ist es aus Sicht der Enquete-Kommission dringend erforderlich, daß bis zur UN-Konferenz über Umwelt und Entwicklung 1992 in Brasilien von möglichst vielen Ländern an den obigen Zielvorgaben orientierte erste Potentialabschätzungen vorgelegt werden. Insbesondere sind auch Datenerhebung in den Entwicklungsländern erforderlich, damit sich der für diese Länder angegebene Wert an den umweltpolitischen Notwendigkeiten orientiert und auf der Basis von Potentialabschätzungen weiter differenziert und konkretisiert werden kann.

Vor diesem Hintergrund ergeben die genannten Reduktionsziele zusammen eine Verminderung der weltweiten CO<sub>2</sub>-Emissionen bis zum Jahr 2005 um mindestens 5 Prozent, bezogen auf das Jahr 1987, und – geschätzt – um mindestens 12 Prozent gegenüber den Emissionen des Jahres 1990.

Die Kommission empfiehlt ferner im Rahmen dieser Reduktionspläne die Emissionen der weiteren energiebedingten klimarelevanten Spurengase, insbesondere des Methans, der Stickoxide, des Kohlenmonoxids und der flüchtigen organischen Verbindungen (ohne Methan) um wesentlich höhere, noch im einzelnen zu bestimmende Prozentsätze zu reduzieren. Die Emissionen sind nicht nur bei der Verbrennung der fossilen Energieträger Kohle, Erdöl und Erdgas zu ver-

### Reduktionsziele der Enquete-Kommission zur Verminderung der energiebedingten CO<sub>2</sub>-Emissionen bis zu den Jahren 2005 und 2050.

Angaben in Prozent, bezogen auf die Emissionen der jeweiligen Ländergruppen im Jahr 1987

Ländergruppen	Reduktionsziele, in %, bezogen auf die Emissionen der Ländergruppen im Jahr 1987	
	bis 2005 mindestens	bis 2050 mindestens
westliche und östliche Industrieländer zusammen . . .	-20	-80
wirtschaftsstarke westliche Industrieländer mit derzeit besonders hohen Pro-Kopf-Emissionen . . . .	-30	-80
Europäische Gemeinschaften insgesamt . . . . .	-20 bis -25	-80
Entwicklungsländer zusammen . . . . .	+50	+70
weltweit . . . . .	- 5	-50

mindern, sondern auch in den vorgelagerten Prozessen, insbesondere die Methan-Emissionen aus dem Kohlebergbau (Grubengas), der Erdölförderung, der Erdgasförderung und die Leckageverluste beim Transport und bei der Verteilung von Erdgas.

Eine Reduktion der CO<sub>2</sub>-Emissionen um 5 Prozent weltweit bis zum Jahr 2005, bezogen auf das Jahr 1987, erscheint in Anbetracht der bisher in der öffentlichen Diskussion ohne konkrete Grundlagenberechnungen proklamierten Zielsetzungen als relativ gering, bedeutet aber bei genauerer Betrachtung der Sachlage bisher kaum vorstellbare Anstrengungen. Einige Aspekte mögen dies verdeutlichen:

- Aufgrund der vorhandenen Datenlage wurde als Basisjahr das Jahr 1987 gewählt. Inzwischen sind im Zeitraum von 1987 bis 1990 der weltweite Energieverbrauch um etwa acht Prozent und die CO<sub>2</sub>-Emissionen um etwa sieben Prozent angestiegen, so daß die CO<sub>2</sub>-Emissionen von 1990 bis 2005 bereits um etwa 12 Prozentpunkte reduziert werden müssen, um zu dem Wert der absoluten CO<sub>2</sub>-Emissionen bis zum Jahr 2005 zu gelangen, der einer Reduktion um 5 Prozent gegenüber dem Jahr 1987 entspricht (vgl. Abb. 12).
- Die Komplexität der Sachlage erfordert außergewöhnliche Anstrengungen und einen breiten internationalen Konsens über die Bedeutung der zu leistenden Aufgabe, wenn bis zum Jahr 1992 eine Internationale Konvention über Klima und Energie und spätestens bis zum Jahr 1994 entsprechende Protokolle verabschiedet und alle diese Abkommen bis spätestens 1995 in Kraft getreten sein sollen. Bis dahin werden aber aller Voraussicht nach die weltweiten CO<sub>2</sub>-Emissionen weiterhin ansteigen, auch wenn von einzelnen Ländern bereits erste Maßnahmen zur CO<sub>2</sub>-Reduktion ergriffen werden und so bereits eine leichte Absenkung der Trendentwicklung erreicht werden könnte. Für den Fall, daß die CO<sub>2</sub>-Emissionen von 1990 bis zum Inkrafttreten der internationalen Vereinbarungen im Jahr 1995 um weitere 10 Prozentpunkte ansteigen, müssen von 1995 bis 2005 die CO<sub>2</sub>-Emissionen um etwa 22 Prozentpunkte weltweit reduziert werden. Diese 22 Prozentpunkte Reduk-

tion von 1995 bis 2005 entsprechen etwa der Reduktion um 5 Prozentpunkte von 1987 bis 2005 (vgl. Abb. 12).

- In den vergangenen zwei Jahrzehnten stieg der weltweite Energieeinsatz jährlich im Durchschnitt um etwa 2 Prozent an. Dabei lag der jährliche Zuwachs in den späten achtziger Jahren höher als in diesem Durchschnitt; im Jahr 1989 betrug er nach vorläufigen Angaben rund 3,5 Prozent. Wenn sich der Trend des Energieverbrauchs der vergangenen beiden Jahrzehnte fortsetzen würde, würden gemäß den im Studienprogramm untersuchten Energieszenarien die weltweiten CO<sub>2</sub>-Emissionen aus dem Energiebereich von 1987 bis zum Jahr 2005 um etwa 40 Prozent steigen (vgl. Abb. 12). Durch die genannten Zielvorgaben würde erreicht, daß die weltweiten energiebedingten CO<sub>2</sub>-Emissionen des Jahres 2005 bei rund 95 Prozent des Wertes von 1987 liegen würden, und nicht bei 140 Prozent, die einer Trendentwicklung ohne spezifische Maßnahmen zur Eindämmung des Treibhauseffektes erreicht würden.
- Mögliche Aufteilungen der Reduktionsanteile für die Industrieländer einerseits und mögliche Begrenzungen der Zuwächse für die Entwicklungsländer andererseits sind in Abbildung 13 graphisch wiedergegeben. Der Graphik ist beispielsweise zu entnehmen, daß eine weltweite Reduktion um 5 Prozent (obere Gerade) erreicht werden kann, wenn (ausgefüllter Kreis) die Industrieländer (westliche und östliche Industrieländer zusammen) ihre CO<sub>2</sub>-Emissionen auf 80 Prozent, also um 20 Prozent verringern, wobei die Entwicklungsländer das 1,5fache emittieren, also einen Anstieg ihrer Emissionen um 50 Prozent zulassen können.

Dies muß vor folgendem Hintergrund gesehen werden. Es ist mit Sicherheit davon auszugehen, daß die Entwicklungsländer im Zuge ihrer wirtschaftlichen Entwicklungsanstrengungen und einer wachsenden Bevölkerung in der Zukunft einen steigenden Energiebedarf und steigende Emissionen haben werden. Aus diesen Gründen scheint es aus heutiger Sicht völlig unrealistisch, in naher Zukunft von den Entwicklungsländern eine Re-

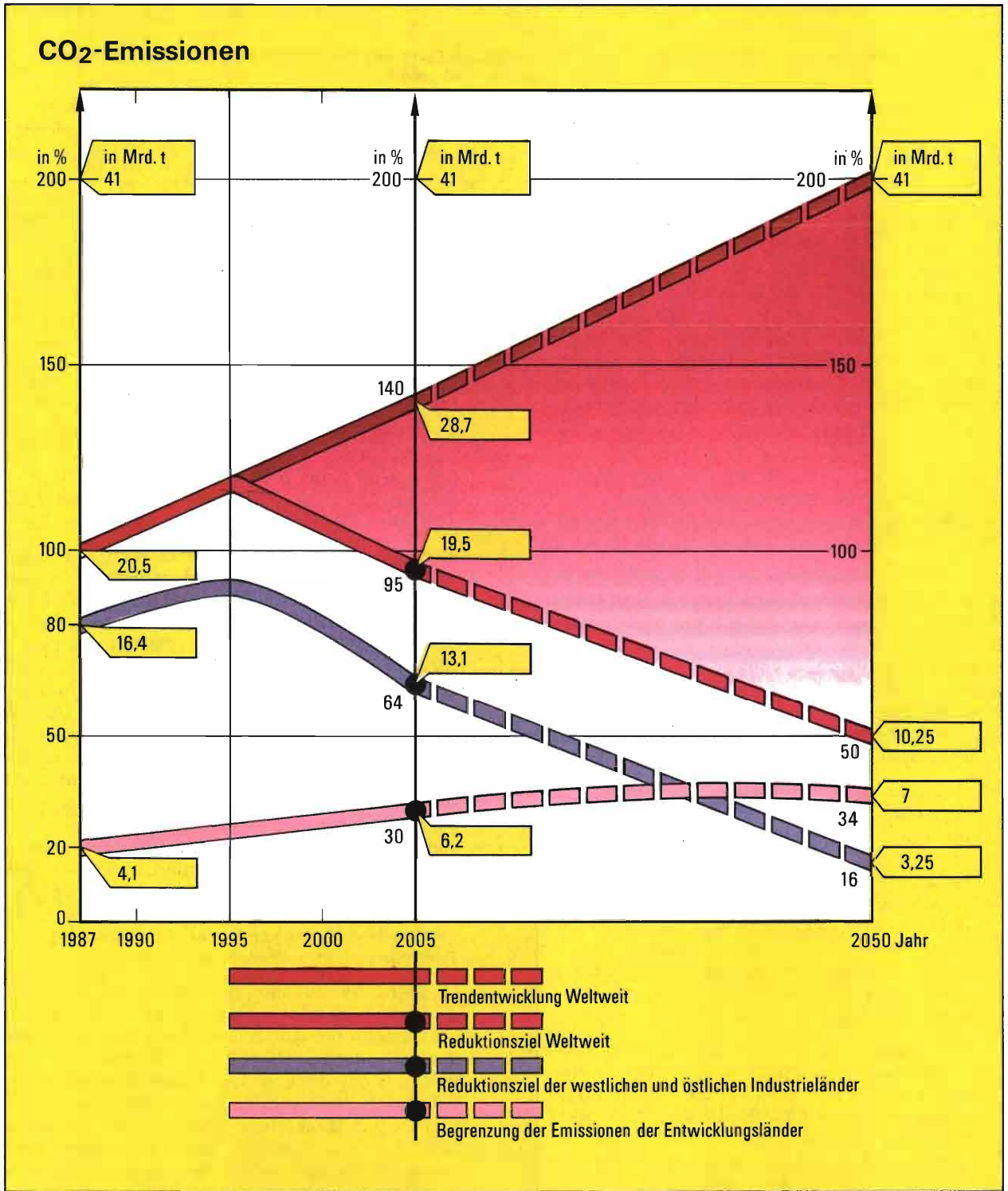


Abb. 12: Energiebedingte CO<sub>2</sub>-Emissionen bis zu den Jahren 2005 und 2050 nach dem Reduktionsplan der Enquete-Kommission: Reduktionsziele für die Industrieländer und Ziele für die Begrenzung der Zuwächse von Emissionen in den Entwicklungsländern (vgl. Tab. 4)

Alle Angaben in Milliarden Tonnen (Mrd. t) und in Prozent, bezogen auf die Gesamtemissionen von rund 20,5 Mrd. im Basisjahr 1987. Die eingezeichneten Kurven sind nicht als exakte Vorgaben im Sinne von Szenariorechnungen zu verstehen, sondern dienen der Illustration möglicher Verläufe zu den anvisierten Zielen.<sup>1)</sup>

<sup>1)</sup> Die Zuordnung der weltweiten CO<sub>2</sub>-Emissionen auf die Ländergruppen der Industrieländer (rund 80 Prozent Anteil im Jahr 1987) und der Entwicklungsländer (rund 20 Prozent im Jahr 1987) erfolgte überschlägig; eine differenzierte Auftei-

lung ist im Rahmen der Verhandlungen über die Internationale Konvention über Klima und Energie in den Anhängen über Geber- und Nehmerländer festzulegen (vgl. Nr. 2.1.2 und Abschnitt F, 2. Kapitel).

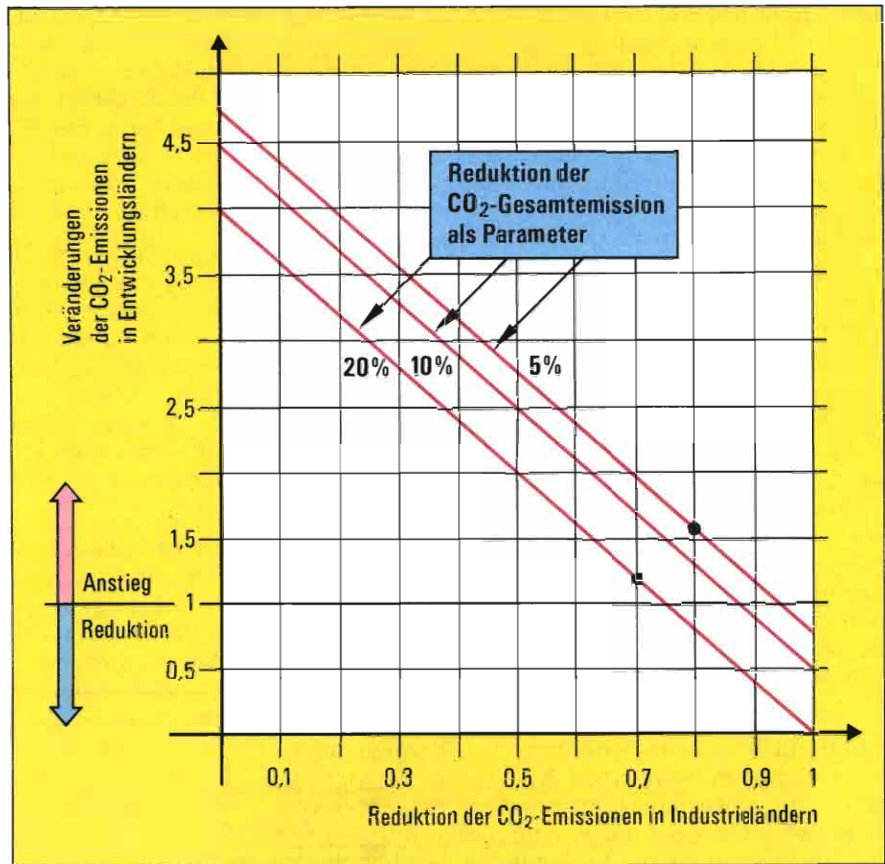


Abb. 13: Relative Veränderungen der energiebedingten CO<sub>2</sub>-Emissionen und mögliche Aufteilung der Reduktionsanteile für Industrieländer (westliche Industrieländer zusammen) und Entwicklungsländer (einschließlich der Volksrepublik China) für angenommene weltweite Reduktionsziele von 5 Prozent, 10 Prozent und 20 Prozent bis zum Jahr 2005, bezogen auf das Jahr 1987 mit dem Wert 1.

Der Graphik liegt ein CO<sub>2</sub>-Emissionsanteil der Industrieländer im Jahr 1987 von 80 Prozent und ein Anteil der Entwicklungsländer von 20 Prozent zugrunde. Dargestellt sind drei Geraden, deren Parameter die weltweiten Reduktionsziele sind, von oben nach unten 5 Prozent, 10 Prozent und 20 Prozent CO<sub>2</sub>-Reduktion.

Auf der Abzisse aufgetragen ist der relative CO<sub>2</sub>-Emissionsanteil der Industrieländer, auf der Ordinate derjenige der Entwicklungsländer. (nach: Umweltbundesamt 1990)

duktion der absoluten CO<sub>2</sub>-Emission abzuverlangen. Dennoch sollten die Entwicklungsländer Bereitschaft zeigen, ihren Emissionsanstieg so weit wie möglich in Grenzen zu halten. Hierzu ist der Aufbau einer effizienten Energieversorgung mit möglichst geringen Emissionen durch entsprechenden Technologietransfer der Industrieländer und durch eine bedarfsgerechte Technologieentwicklung auf Seiten der Endenergieverbraucher in den Entwicklungsländern Grundbedingung.

Auch die Zielvorgabe der Toronto-Konferenz aus dem Jahr 1988 läßt sich illustrieren: Eine weltweite CO<sub>2</sub>-Reduktion um 20 Prozent gegenüber 1987 (untere Gerade in Abb. 13) ließe sich erreichen durch (ausgefülltes Quadrat) eine Reduktion der Industrieländer zusammen um 30 auf 70 Prozent der Emissionen, wobei die Emissionen der Entwicklungsländer allerdings nur auf das 1,2 fache, also um 20 Prozent, ansteigen könnten. Diese Aus-

sagen sind jeweils bezogen auf das Basisjahr 1987. Aufgrund des seither bereits erfolgten Zuwachses würde dies bedeuten, daß die Entwicklungsländer zukünftig so gut wie keinen Anstieg der Emissionen mehr zulassen dürften und daß die CO<sub>2</sub>-Emissionen wirtschaftsstarker Industrieländer von 1987 bis 2005 um mindestens 40 Prozent gesenkt werden müßten. Die Empfehlung von Toronto aus dem Jahre 1988, die energiebedingten CO<sub>2</sub>-Emissionen bis zum Jahr 2005 um weltweit 20 Prozent zu reduzieren, wären daher im Hinblick auf den Schutz der Erdatmosphäre zwar wünschenswert, sind aber aus Sicht der Kommission nicht erreichbar.

### 2.1.2 Internationale Konvention über Klima und Energie und dazugehörige Protokolle

Die Kommission empfiehlt dringend, Maßnahmen zu ergreifen, damit die Energieeffizienz in den Entwick-

lungsländern so weit verbessert wird, daß der energiebedingte Emissionsanstieg von CO<sub>2</sub> in diesen Ländern bis zum Jahr 2005 rund 50 Prozent, bezogen auf das Jahr 1987, nicht überschreitet. Auf diese Weise würden die Entwicklungsländer einen erheblichen Beitrag zum Schutz der Erdatmosphäre leisten. Da der Energiebedarf unter anderem auch mit der Bevölkerungszahl zusammenhängt, ist ferner in den Entwicklungsländern eine geeignete Bevölkerungspolitik notwendig, die das Ziel verfolgt, das gegenwärtig sehr hohe Bevölkerungswachstum merklich einzuschränken, was aus einer Reihe anderer Gründe, wie Hunger und Armut, ohnehin notwendig ist.

Die Kommission will den internationalen Verhandlungen über die regionale und nationale Aufteilung der Reduktionspflichten nicht vorgreifen. Die oben genannten Eckwerte zur Aufteilung der Reduktionen auf die verschiedenen Länder und Ländergruppen sowie mögliche Verläufe der Reduktionen sind daher nicht als Vorgaben für die Verteilung der Reduktionspflichten zu verstehen, sondern als Überschlagsrechnung zur Verdeutlichung der auf die einzelnen Länder zukommenden Größenordnung der notwendig werdenden Reduktionen beziehungsweise Begrenzungen des Anstiegs.

Aufgrund der großen Bedeutung des Energiebereichs hat die Kommission einen Konventionentwurf für eine „Internationale Konvention über Klima und Energie“ (vgl. Abschnitt F, 2. Kapitel) erarbeitet, der die hier dargelegten Überlegungen beinhaltet und eine tragfähige Basis für eine erfolgreiche Bekämpfung des zusätzlichen Treibhauseffektes darstellt. In Anbetracht der globalen Gefährdung durch die befürchteten Folgen des zusätzlichen Treibhauseffektes hält es die Kommission für dringend geboten, daß auf dieser Grundlage spätestens im Jahr 1992 während der UN-Konferenz über Umwelt und Entwicklung in Brasilien eine Internationale Konvention über Klima und Energie verabschiedet wird.

Die konkreten Reduktionsvereinbarungen, insbesondere die globale Höhe der Reduktionspflichten für die Emission aller energiebedingter klimarelevanter Spurengase, die Zeithorizonte und die Kriterien für die Verteilung der Reduktionspflichten – das heißt erhebliche Reduktionen in den Industrieländern und bei entsprechender Energieeffizienz Ausbauoptionen für die Entwicklungsländer – sollten in einem Spurengas-Protokoll festgelegt werden, das die Internationale Konvention über Klima und Energie konkretisiert und spätestens im Jahr 1995 in Kraft tritt.

Die Kommission teilt die Auffassung, daß die westlichen und östlichen Industrieländer als bisherige Hauptverursacher die Hauptverantwortung tragen und in der Summe die Emissionen des Jahres 1987 um mindestens 20 Prozent bis zum Jahr 2005 reduzieren müssen. Die Bundesrepublik Deutschland und andere wirtschaftlich starke Industrieländer mit hohen Pro-Kopf-Emissionen sollten die CO<sub>2</sub>-Emissionen bis zum Jahr 2005 um mindestens 30 Prozent, ausgehend von den Werten des Jahres 1987, und die Emissionen der anderen energiebedingten klimarelevanten Spurengase zum Teil noch wesentlich stärker vermindern. Nähere Ausführungen zu den nationalen Handlungsempfehlungen enthält das 4. Kapitel.

Die Bundesregierung wird ersucht, auf internationaler Ebene dafür einzutreten, daß in Zukunft sowohl in den Industrieländern als auch – entsprechend angepaßt an die Situation – in den Entwicklungsländern der rationelleren Energieumwandlung und -nutzung, der Energieeinsparung sowie der verstärkten Nutzung der erneuerbaren Energien Priorität im Energiebereich eingeräumt wird.

Insgesamt kommt den Industrieländern eine Vorreiterfunktion zu, ihre Energiepolitik durch geeignete Maßnahmen zu ändern und auf das Erreichen dieser Ziele auszurichten. Zusätzlich müssen auch Mechanismen zur Verbesserung des Technologietransfers und bedarfsgerechter Technologieentwicklungen in den Entwicklungsländern geschaffen werden, damit auch den Entwicklungsländern die jeweils umweltfreundlichste Technologie zur Verfügung stehen kann.

Zu diesem Zweck sollte ein Internationaler Treuhandfonds zur Reduktion energiebedingter klimarelevanter Spurengasemissionen eingerichtet werden. Eine Vereinbarung über diesen Fonds sollte Satzung, Aufgaben, Finanzierung und die Verteilung der zur Erfüllung der Aufgaben erforderlichen Mittel regeln. Diese Vereinbarung sollte frühzeitig, möglichst zeitgleich mit dem Spurengas-Protokoll, in Kraft treten. Es sollte ein jährlich einzuzahlender Betrag von anfangs 20 Milliarden DM angestrebt werden, der in den ersten Jahren nach Gründung des Fonds vor allem durch die Industrieländer aufgebracht werden sollte. Der Betrag sollte dann bei regelmäßigen Überprüfungen den Erfordernissen der zum Erreichen der Reduktionsquoten und Ausbauoptionen notwendigen Maßnahmen angepaßt werden. Darüber hinaus ist die Wirksamkeit und die Effizienz der eingeleiteten Maßnahmen zu überprüfen.

Um die internationalen Verhandlungen voranzutreiben, ersucht die Enquete-Kommission die Bundesregierung, sich dafür einzusetzen, daß bei der 2. Weltklimakonferenz im November 1990 in Genf eine Empfehlung verabschiedet wird, derzufolge bei der UN-Konferenz über Umwelt und Entwicklung im Jahr 1992 in Brasilien eine Internationale Konvention über Klima und Energie verabschiedet wird.

Die Kommission hält es für zwingend erforderlich, daß im Zuge der Vorbereitung dieser Konferenz möglichst viele Staaten, insbesondere die USA, die EG, Japan, die Sowjetunion, die Volksrepublik China, Indien und Kanada, bis Mitte des Jahres 1991 ihre Reduktionspotentiale im Energiesektor nach einer vergleichbaren Methodik ermitteln. Dies ist notwendig, damit die Verhandlungen über die zu verabschiedende Internationale Konvention über Klima und Energie und die konkretisierenden Protokolle auf einer soliden Basis geführt werden können und die Mitglieder der internationalen Staatengemeinschaft sich zügig über die von ihnen zu leistenden Beiträge verständigen können. Die Kommission unterstützt in diesem Zusammenhang nachdrücklich die Initiative der Vereinten Nationen, in der Volksrepublik China im Frühjahr 1991 eine internationale Arbeitstagung durchzuführen, die unter anderem auch der Ermittlung der Reduktionspotentiale in den Ländern mit den höchsten Emissionen dienen kann. Ähnliche Arbeitstagungen

sollten nach Möglichkeit auch in der UdSSR und in Indien durchgeführt werden. Die während dieser Tagungen und in anderen Ländern gewonnenen Einsichten über mögliche Reduktionspotentiale einzelner Länder sollten auf einer noch 1991 anzuberaumenden Konferenz zur Vorbereitung der UN-Konferenz über Umwelt und Entwicklung ausgewertet werden. Die Bundesregierung wird ersucht, die Vereinten Nationen bei der Vorbereitung der Potentialstudien und der Konferenzen in diesen Ländern nachhaltig zu unterstützen.

## 2.2 Maßnahmen im Rahmen der Europäischen Gemeinschaften

Die Enquete-Kommission ersucht die Bundesregierung, noch im Jahr 1991 im Rahmen des EG-Abstimmungsprozesses darauf hinzuwirken, daß sich die EG auf gemeinsame und möglichst weitreichende Reduktionsziele verständigt.

Die Enquete-Kommission ersucht die Bundesregierung, darauf hinzuwirken, daß die EG, ausgehend von beispielhaftem Vorgehen ihrer Mitgliedstaaten, insgesamt eine Vorreiterrolle bei der Verminderung der energiebedingten klimarelevanten Spurengasemissionen einnimmt.

Für die Verringerung der Summe der CO<sub>2</sub>-Emissionen aus dem Gebiet der EG hält die Enquete-Kommission angesichts der gebotenen weltweiten Reduktionsziele folgenden Stufenplan, jeweils bezogen auf den Stand des Jahres 1987, für notwendig:

- Einfrieren der Emissionen bis spätestens zum Jahr 1995;
- Reduktion der Emissionen um mindestens 10 Prozent bis zum Jahr 2000;
- Reduktion der Emissionen des Jahres 1987 bis zum Jahr 2005 um mindestens 20 bis 25 Prozent.

Dabei ist zu berücksichtigen, daß allein die Bundesrepublik Deutschland (einschließlich der ehemaligen DDR), die nach Auffassung der Enquete-Kommission 30 Prozent ihrer CO<sub>2</sub>-Emissionen künftig vermeiden soll, mit ihrem Beitrag rund 10 Prozentpunkte des Reduktionsziels der EG für das Jahr 2005 erbringt (vgl. 4. Kap.).

Die Emissionen der weiteren energiebedingten klimarelevanten Spurengase, in erster Linie der Stickoxide, des Methans, des Kohlenmonoxids und der flüchtigen organischen Verbindungen (ohne Methan), sind in einem weitergehenden, im einzelnen noch zu spezifizierenden Umfang zu vermindern.

Die EG sollte geeignete Maßnahmen zum Erreichen der Reduktionsziele spätestens im Jahr 1992 beschließen und einleiten sowie ihre an den langfristigen Reduktionen orientierte Energie- und Umweltpolitik alle zwei Jahre überprüfen und gegebenenfalls den Erfordernissen anpassen.

Im Hinblick auf die im Jahr 1992 zu verabschiedende Internationale Konvention über Klima und Energie sollte gleichzeitig eine gemeinsame EG-Strategie er-

arbeitet werden, die auch die Rolle der EG im weltweiten Kontext beinhaltet.

Damit die für die notwendigen internationalen Abstimmungsprozesse und den Abschluß von Vereinbarungen sehr kurze Zeitspanne eingehalten werden kann, ersucht die Enquete-Kommission die Bundesregierung, darauf hinzuwirken, daß die EG bereits bei ihrem nächsten Gipfel geeignete Maßnahmen in die Wege leitet.

Hierzu sind unter anderem Studien zu vergeben, die innerhalb eines Jahres im Hinblick auf eine Verringerung der CO<sub>2</sub>-Emissionen um mindestens 20 bis 25 Prozent für die EG insgesamt bis zum Jahr 2005 sowie eine Reduktion der weiteren energiebedingten klimarelevanten Spurengasemissionen in größerem, noch zu spezifizierendem Umfang

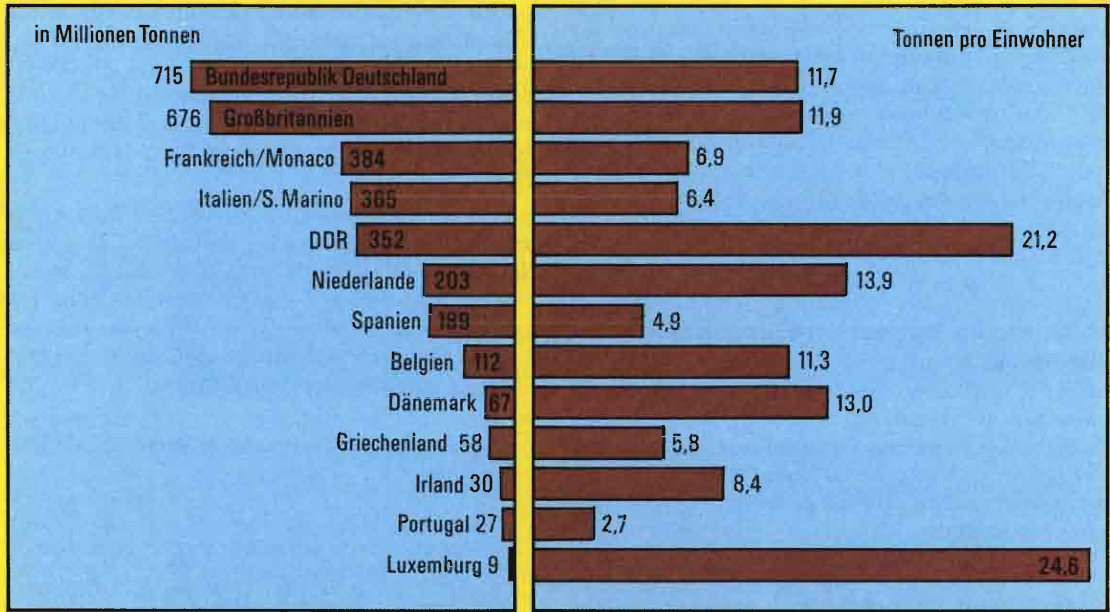
- so schnell wie möglich die technischen und wirtschaftlichen Reduktionsmöglichkeiten für alle Mitgliedsländer ermitteln;
- die geeignetsten Maßnahmen für gemeinsame EG-weite Reduktionsstrategien ermitteln;
- bis zum Wintergipfel 1991 unter Zugrundelegung des EG-Reduktionsziels von mindestens 20 bis 25 Prozent sowie der Vorgabe, daß wirtschaftsstarke EG-Mitglieder um 30 Prozent bis zum Jahr 2005 reduzieren, einen Kriterienmix mit entsprechender Gewichtung der einzelnen Kriterien erarbeiten, auf dessen Grundlage eine länderspezifische Festlegung von Reduktionspflichten erfolgen kann.

Denkbar wäre unter anderem die Einbeziehung folgender Kriterien:

- Höhe der Pro-Kopf-Emissionen,
- wirtschaftliche Leistungskraft,
- Energieintensität,
- bestehende Energieträgerstruktur,
- Ausfuhr-/Einfuhrbilanz energieintensiver Produkte und Verfahren,
- Zugehörigkeit zu einer Ländergruppe,
- Bevölkerungsentwicklung,
- Einfluß großer Flüchtlingsströme und Migrationen,
- Einfluß des Klimas auf den Energieverbrauch (Heizung, Kühlung),
- Emissionen pro Landfläche,
- kumulierte Emissionen,
- zu erwartendes Ausmaß der regionalen Folgen des zusätzlichen Treibhauseffektes.

Durch das vorgeschlagene Verfahren, das unter Zugrundelegung des EG-weiten Reduktionsziels und der Vorgabe, daß wirtschaftsstarke EG-Mitglieder mit besonders hohen Pro-Kopf-Emissionen mindestens 30 Prozent reduzieren müssen, zu unterschiedlichen Reduktionspflichten für die Mitgliedstaaten führen wird, wird eine den spezifischen Ausgangssituationen der Länder angepaßte annähernd gleich hohe Belastung erreicht. Eine Benachteiligung einzelner Länder wird weitestgehend ausgeschlossen.

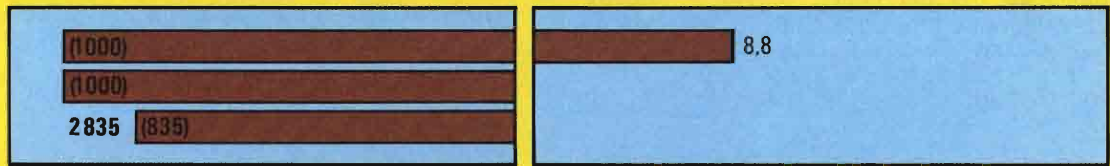
### CO<sub>2</sub>-Emission in der EG



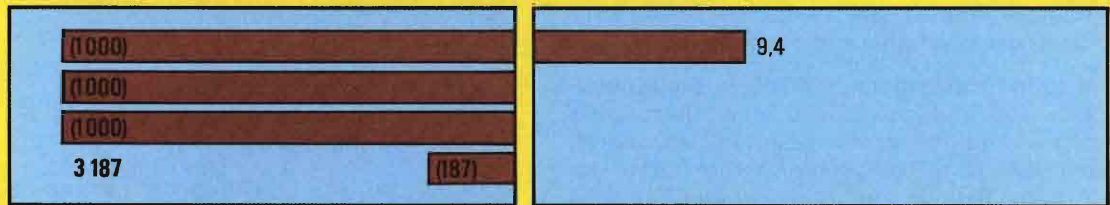
#### Bundesrepublik Deutschland (einschließlich der ehemaligen DDR)



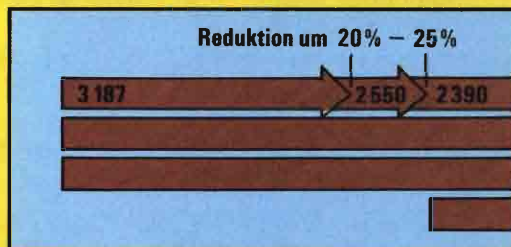
#### EG (ohne ehemalige DDR)



#### EG (einschließlich der ehemaligen DDR)



#### EG (einschließlich der ehemaligen DDR)



**Reduktionsplan der  
Enquete-Kommission  
bis zum Jahr 2005**

Abb. 14: Energiebedingte CO<sub>2</sub>-Emissionen der EG-Mitgliedstaaten und der EG insgesamt, in Millionen Tonnen CO<sub>2</sub> und in Tonnen CO<sub>2</sub> pro Kopf im Jahr 1986 (Quelle: s. Tab. 3)



Auf der Grundlage dieser Studien sollte die EG Vorschläge erarbeiten, um im Jahr 1992 für das EG-weite und das weltweite Vorgehen geeignete Maßnahmen auf fundierter Basis zu beschließen. Diese Vorschläge sollten ausdrücklich vorsehen, daß die Art und Weise, wie die einzelnen Mitgliedstaaten der EG ihre spezifische Reduktionsquote erfüllen, ihrer Wahl überlassen bleibt. Weiterhin sollten die Vorschläge beinhalten, daß die EG-Mitglieder sich untereinander insoweit beim Erreichen von länderspezifischen Reduktionszielen unterstützen, wie dies aus finanziellen und technologischen Erwägungen heraus dann begründet ist, wenn der Kriterienmix bestimmte länderspezifische Faktoren nicht ausreichend berücksichtigen konnte.

### 3. Empfehlungen zum Schutz der tropischen Wälder

Die Kommission ist der Auffassung, daß die gegenwärtig rapide zunehmende Vernichtung der tropischen Wälder mit sofort einzuleitenden weitreichenden Maßnahmen bis zum Jahr 2000 im weltweiten Durchschnitt deutlich abgeschwächt und partiell so weit und so rasch wie möglich, weltweit bis spätestens zum Jahr 2010, gänzlich gestoppt und der Waldbestand in den Tropen durch umfangreiche Aufforstung spätestens bis zum Jahre 2030 wieder auf den Wert von 1990 zurückgeführt werden muß. Damit dieses Ziel erreicht wird, schlägt die Kommission unter anderem ein Sofortprogramm zum Schutz der tropischen Wälder, eine Internationale Konvention zum Schutz der tropischen Wälder, die wie die Internationale Konvention über Klima und Energie spätestens im Jahr 1992 während der UN-Konferenz über Umwelt und Entwicklung in Brasilien verabschiedet werden soll, und die Einrichtung eines Internationalen Treuhandfonds vor, in den jährlich 10 Milliarden DM eingezahlt werden sollen. Diese und weitere Maßnahmenvor-

schläge sind im zweiten Bericht der Kommission detailliert dargelegt.

Im Gegensatz zu Teilen der internationalen Diskussion, die Energieproblematik und die Vernichtung der Wälder in einer Konvention abzuhandeln, hält es die Enquete-Kommission aus sachlichen Gründen für das effizientere Vorgehen, daß die beiden Bereiche mit ihren unterschiedlichen Problemlagen separat voneinander geregelt werden (vgl. den zweiten Bericht der Kommission). Die unterschiedlichen Problemlagen berühren sich nur insoweit, als beide Bereiche durch Spurengasemissionen zum zusätzlichen Treibhauseffekt beitragen. Der globale Klimaaspekt ist aber nur einer der Gründe für die Schaffung einer Konvention zum Schutz der tropischen Wälder, mit der auch die Erhaltung der Artenvielfalt, der Schutz indigener Gesellschaften und die Abwehr regionaler Klimaveränderungen sowie anderer ökologischer, ökonomischer und sozialer Schäden gesichert werden soll.

Dem zum Teil vorgebrachten Argument, es sei nicht angemessen, eine separate Tropenwald-Konvention zu verabschieden, da dies nur die Entwicklungsländer mit hohen Kosten belaste, die Verantwortung der Industrieländer für den weitaus größten Teil der Treibhausgasemissionen aber nicht berücksichtige, vermag die Kommission aus zwei Gründen nicht zu folgen. Zum einen ist der im zweiten Bericht der Kommission geforderte Internationale Treuhandfonds zum Schutz der tropischen Wälder, in den die Industrieländer die weitaus größten Beiträge einzahlen würden, Ausdruck der eingeforderten Verantwortung der Industrieländer. Zum anderen dient gerade die von der Kommission zeitgleich eingeforderte Internationale Konvention über Klima und Energie dazu, den Industrieländern als bisher hauptverantwortlichen Verursachern der energiebedingten klimarelevanten Spurengasemissionen gravierende Reduktionen abzuverlangen, während den Entwicklungsländern

Tabelle 5

#### Zeitplan für die Umsetzung der von der Enquete-Kommission vorgeschlagenen Gesamtstrategie zum Schutz der Erdatmosphäre

1990	Empfehlung der 2. Weltklimakonferenz in Genf, sowohl eine Internationale Konvention über Klima und Energie als auch eine Internationale Konvention zum Schutz der tropischen Wälder auf der 1992 in Brasilien stattfindenden UN-Konferenz über Umwelt und Entwicklung zu verabschieden
1991	Abhaltung zweier Vorbereitungskonferenzen zur Aushandlung der entsprechenden Konventionsentwürfe
1992	Verabschiedung der Internationalen Konventionen über Klima und Energie und zum Schutz der tropischen Wälder während der UN-Konferenz über Umwelt und Entwicklung in Brasilien Verschärfung und Erweiterung des Montrealer Protokolls über Stoffe, die zu einer Zerstörung der Ozonschicht führen, anlässlich einer Vertragsstaatenkonferenz zum Montrealer Protokoll
1994	Verabschiedung der Durchführungsprotokolle zu den genannten Konventionen
1995	Inkrafttreten der Protokolle und der Internationalen Treuhandfonds zur Reduktion energiebedingter klimrelevanter Spurengase und zum Schutz der tropischen Wälder
1998	Vorbereitungskonferenz zur Ausarbeitung von Empfehlungen für eine Überführung aller bestehenden sektoralen internationalen Vereinbarungen, die dem Schutz der Erdatmosphäre dienen, in eine entscheidende Gesamtkonvention
2000	Verabschiedung der Gesamtkonvention zum Schutz der Erdatmosphäre



Abb. 15: Vertragswerk zum Schutz der Erdatmosphäre

zusätzliche, wenn auch begrenzte Anstiege ihrer Emissionen um zusammen rund 50 Prozent bis zum Jahre 2005 und um insgesamt rund 70 Prozent bis zum Jahr 2050 eingeräumt werden, um ihre Entwicklungsbestrebungen nicht zu behindern.

#### **4. Handlungsbedarf im Bereich Landwirtschaft und Welternährung**

Nach Auffassung der Kommission muß weltweit eine systematische Strategie zum Schutz der Ökosysteme und zur Sicherung einer ökologie- und klimaverträglichen, ausreichenden und hochwertigen Lebensmittelversorgung durch geeignete Maßnahmenbündel, insbesondere im Bereich der Landwirtschaft, entwickelt werden. Die Kommission gibt dazu noch keine näheren Empfehlungen ab, da dieser Themenkomplex noch differenziert aufgearbeitet werden muß.

#### **5. Integration der bereits bestehenden und noch zu schaffenden internationalen Vereinbarungen für die einzelnen Bereiche zu einer Gesamtkonvention zum Schutz der Erdatmosphäre im Jahr 1998**

Die Kommission empfiehlt, spätestens im Jahr 2000 eine Internationale Konvention zum Schutz der Erdatmosphäre zu verabschieden.

Diese Gesamtkonvention soll die Regelung aller klimarelevanten Spurengasemissionen umfassen. Zu diesem Zweck ist es notwendig, die entsprechenden Regelungsinhalte der sektoralen Übereinkommen und Protokolle in ein neu zu schaffendes Vertragswerk zu integrieren. Während die bis dahin geschaffenen sektoralen Übereinkommen Lösungskonzepte für die einzelnen Bereiche beinhalten und daher nicht allein dem Schutz der Erdatmosphäre dienen, soll die Dachkonvention vorrangig auf diesen Zweck ausgerichtet sein und die Basis für ein internationales Luftrecht bilden.

#### **6. Schaffung eines Umweltrates**

Die Kommission fordert die Bundesregierung weiterhin auf, sich in den entsprechenden internationalen Gremien für die Schaffung eines internationalen Umweltrates einzusetzen, der zur Stärkung der weltweiten Umweltpolitik, insbesondere auch für Maßnahmen zum Schutz der Erdatmosphäre, nötig ist. Die Einrichtung eines solchen Gremiums sollte während der 1992 in Brasilien stattfindenden UN-Konferenz über Umwelt und Entwicklung erörtert und schnellstmöglichst beschlossen werden.

## 4. KAPITEL

### Nationale Handlungsempfehlungen zur Reduktion der Emissionen energiebedingter klimarelevanter Spurengase

Alle Staaten sind aufgerufen, neben dem internationalen Vorgehen umgehend nationale Sofortprogramme und Langfriststrategien zum Schutz der Erdatmosphäre einzuleiten. Das für die Lösung des Problems notwendige internationale Vorgehen darf nicht dazu verleiten, bis zum Abschluß entsprechender internationaler Vereinbarungen mit dem Handeln auf nationaler Ebene zu warten.

Die Enquete-Kommission hält es daher angesichts des aktuellen wissenschaftlichen Kenntnisstandes und nach dem Vorsorgeprinzip für notwendig, geeignete Maßnahmen zur Eindämmung des zusätzlichen Treibhauseffektes auch im nationalen Rahmen unverzüglich einzuleiten. Dabei darf die Einbettung der Bundesrepublik Deutschland in die EG-Entwicklung nicht verlorengehen. Die Bundesrepublik Deutschland muß beispielgebend sein, ohne Wettbewerbspositionen zu verlieren. Über das EG-weit abgestimmte Vorgehen hinaus sieht es die Kommission als dringend erforderlich an, daß Bundestag und Bundesregierung geeignete Schritte unternehmen, die es ermöglichen, mit der Durchführung nationaler Maßnahmen eine Vorreiterrolle zu übernehmen.

Die Kommission weist in diesem Zusammenhang darauf hin, daß viele Maßnahmen, die zur Verringerung

der klimarelevanten Spurengase getroffen werden müssen, mit positiven Begleiteffekten verbunden sind. So ist beispielsweise eine Reduktion der Ozonkonzentration der Troposphäre, die aus Gründen der Eindämmung des Treibhauseffektes zu erfolgen hat, auch gleichzeitig sinnvoll zur Vermeidung von Schäden an der Gesundheit der Menschen und an den Wäldern.

Die Erschließung eines möglichst großen Minderungspotentials der Emissionen von Kohlendioxid, Methan, Stickoxiden, Kohlenmonoxid, Distickstoffoxid und flüchtigen organischen Verbindungen (ohne Methan) ist daher ohnehin vorteilhaft und notwendig. Dieser Aspekt gewinnt noch an Bedeutung, wenn alle langfristigen und externen Kosten und Schäden berücksichtigt werden. Dies gilt für alle Bereiche und ganz besonders für die Bereiche Energie, Landwirtschaft und Chemie.

Es ist erforderlich, die heutige Energieversorgung angesichts der dargestellten Problemlage grundlegend zu modernisieren und dabei Möglichkeiten und Realisierungswege zu finden, negative Folgewirkungen zu minimieren oder zu beseitigen. Dazu existiert ein großer Handlungs-, Entscheidungs-, Forschungs- und Entwicklungsbedarf, so daß die Aufgabe, die aus dem

Energiebereich stammenden Spurengasemissionen zu reduzieren, als zentrale Querschnittsaufgabe von Politik, Wirtschaft, Forschung und Technologie anzusehen ist.

Da die Kommission den Themenkomplex Landwirtschaft-Klima-Erdatmosphäre noch nicht intensiv bearbeitet hat, empfiehlt sie, dazu in der nächsten Wahlperiode notwendige und geeignete Maßnahmen zu erarbeiten. Diese Maßnahmen sind unter der Vorgabe der Minimierung der zu erwartenden Schäden der Klimaänderungen und anderer Einflußgrößen für die Ökosysteme, die Landwirtschaft und die Lebensmittelversorgung zu untersuchen mit dem Ziel, neben internationalen auch nationale Strategien zum Schutz der Ökosysteme, des Bodens und Wassers sowie zur Sicherung einer ökologie- und klimaverträglichen, ausreichenden und hochwertigen Lebensmittelversorgung zu entwickeln.

### 1. Reduktionsziele für die energiebedingten klimarelevanten Spurengasemissionen

Die Kommission empfiehlt, daß die im folgenden genannten prozentualen Ziele zur Reduktion der energiebedingten klimarelevanten Spurengase für die Bundesrepublik Deutschland einschließlich des Gebietes der ehemaligen DDR gelten sollen. Hierbei können sich wegen der gegenwärtigen Energiestruktur und der Bedingungen auf dem Gebiet der bisherigen DDR veränderte Reduktionsbeiträge in den einzelnen Sektoren gegenüber den im Studienprogramm der Kommission ermittelten Werte ergeben. Die Summe der empfohlenen prozentualen Reduktionsziele soll aber auch nach dem Beitritt der DDR unverändert bleiben.

Es ist notwendig, den Kabinettsbeschuß zur Verminderung der CO<sub>2</sub>-Emissionen vom 13. Juni 1990, der auf der Grundlage des Studienprogramms der Kommission erarbeitet wurde, auszuweiten, zu verschärfen und in Maßnahmenprogrammen dahingehend zu konkretisieren, daß

- bis zum Jahr 2005 die CO<sub>2</sub>-Emission um mindestens 30 Prozent reduziert wird;
- in bezug auf die weiteren energiebedingten klimarelevanten Spurengase die Emissionen von Methan (CH<sub>4</sub>) um mindestens 30 Prozent, von Stickoxiden (NO<sub>x</sub>) um mindestens 50 Prozent, von Kohlenmonoxid (CO) um mindestens 60 Prozent und von flüchtigen organischen Verbindungen ohne Methan (NMVOC) um mindestens 80 Prozent bis zum Jahr 2005 vermindert werden.

30 Prozent Reduktion der CO<sub>2</sub>-Emissionen entspricht – ausgehend von einer Emission von 715 Millionen Tonnen CO<sub>2</sub> im Basisjahr 1987 aus dem damaligen Gebiet der Bundesrepublik Deutschland – einer Verminderung um 215 Millionen Tonnen CO<sub>2</sub> auf 500 Millionen Tonnen CO<sub>2</sub> im Jahr 2005.

Für die Bundesrepublik Deutschland einschließlich der ehemaligen DDR bedeutet das Reduktionsziel von 30 Prozent bis zum Jahr 2005 eine Verminderung der CO<sub>2</sub>-Emissionen um 317 Mio. t auf 750 Mio. t, ausgehend von 1067 Mio.t im Jahr 1987<sup>1)</sup>.

Priorität bei diesem Reduktionsplan haben Maßnahmen zur Verbesserung der Energieeffizienz, zur rationelleren Energienutzung und -umwandlung, zur Energieeinsparung sowie zum Ausbau der Nutzung erneuerbarer Energien. Diese Prioritätensetzung hat die Kommission bereits in ihrem ersten Bericht vorgenommen. Sie wurde durch die Ergebnisse des Studienprogramms bestätigt und ist zwischenzeitlich in-

<sup>1)</sup> Dabei ist zu berücksichtigen, daß der Wert von 715 Mio. t CO<sub>2</sub>-Emissionen im Jahr 1987 für die Bundesrepublik Deutschland von den internationalen Statistiken mit einem Wert von 754 Mio. t (im Jahr 1986) für die energiebedingte CO<sub>2</sub>-Emissionen (ohne nichtenergetischen Energieverbrauch) abweicht. Aus Konsistenzgründen wird in diesem Bericht der Wert von 715 Mio. t CO<sub>2</sub> im Jahr 1987, den die für die Kommission angefertigten Studien ermittelt haben, durchgängig verwendet und auf das Problem der möglichst schnell verfügbaren, abgestimmten Datenerhebungen hingewiesen. Für die DDR wurde vorläufig der von den internationalen Statistiken für das Jahr 1986 ausgewiesene Wert von 352 Mio. t CO<sub>2</sub> verwendet und als gleichbleibend für das Jahr 1987 angenommen.

Tabelle 6

#### Reduktionsplan der Enquete-Kommission zur Verringerung der CO<sub>2</sub>-Emissionen der Bundesrepublik Deutschland für das Jahr 2005 (verbindliches Reduktionsziel), sowie Zielorientierungen für die Jahre 2020 und 2050;

Alle Angaben in Millionen Tonnen CO<sub>2</sub>

Die angegebenen Prozentpunkte beziehen sich auf das Basisjahr 1987

	Basis-jahr 1987	1. Stufe: 1987 bis 2005 Reduktionsziel:	2. Stufe 2006 bis 2020 Zielorientierung zusätzlich:	3. Stufe 2021 bis 2050 Zielorientierung zusätzlich:	1. bis 3. Stufe 1987 bis 2050 Zielorientierung insgesamt:
		-30 %	-20 %	-30 %	-80 %
Bundesrepublik Deutschland . . . . . (ohne ehemalige DDR) . . . . .	715	-215 auf 500	-143 auf 357	-215 auf 142	-574 auf 142
Bundesrepublik Deutschland <sup>1)</sup> . . . . . (einschließlich der ehemaligen DDR) .	1 067	-317 auf 750	-213 auf 543	-320 auf 214	-853 auf 214

<sup>1)</sup> Vorläufige Werte

nerhalb der Bundesrepublik Deutschland und der internationalen Diskussion auf breiten Konsens gestoben.

Die Reduktion der CO<sub>2</sub>-Emission um mindestens 50 Prozent weltweit bis zum Jahr 2050, die die Kommission gegenwärtig zur Eindämmung des zusätzlichen Treibhauseffektes als notwendig erachtet, würde für die Industrieländer und damit auch die Bundesrepublik Deutschland bedeuten, ihre CO<sub>2</sub>-Emissionen um eine Größenordnung von 80 Prozent bis zum Jahr 2050 zu vermindern. Die Kommission ersucht daher die Bundesregierung, durch langfristige Untersuchungen zu prüfen, wie die Zielorientierung einer Verringerung der Emission

- von Kohlendioxid und Methan bis zum Jahr 2020 um etwa 50 Prozent und bis zum Jahr 2050 um etwa 80 Prozent erreichbar ist. Auf dieser Basis sind entsprechende langfristige Strategien und Maßnahmenprogramme zur Erreichung solcher Zielorientierungen zu entwickeln.

Außerdem ist durch entsprechende Untersuchungen zu prüfen, wie die Emissionen von

- Stickoxiden bis zum Jahr 2020 um mindestens 70 Prozent und bis zum Jahr 2050 um mindestens 90 Prozent,
- des Kohlenmonoxids bis zum Jahr 2020 um mindestens 75 Prozent und bis zum Jahr 2050 um mindestens 90 Prozent sowie
- die Emissionen der flüchtigen organischen Verbindungen (ohne Methan) bis zum Jahr 2020 um mindestens 90 Prozent und bis zum Jahr 2050 um mindestens 95 Prozent zu reduzieren sind.

Die Kommission hält die genannten Verminderungen der Emissionen bis zum Jahr 2005 aufgrund der Ergebnisse des von ihr durchgeführten Studienpro-

gramms (vgl. Abschnitt E) für realisierbar, wenn die erforderlichen Maßnahmen konkretisiert, eingeleitet und schnellstmöglichst umgesetzt werden.

Die genannten Reduktionsziele für das Jahr 2005 wurden im Studienprogramm der Enquete-Kommission nur für die bisherige Bundesrepublik Deutschland (ohne ehemalige DDR) ermittelt. Dabei wurde angenommen, daß die Bevölkerungszahl der Bundesrepublik Deutschland (ohne ehemalige DDR) im Jahr 2005 60 Millionen Einwohner nicht wesentlich überschreitet. Wanderbewegungen von und in die bisherige DDR haben insofern für diese Fragestellung keine Auswirkung, als die prozentualen Reduktionsquoten auch für die Bundesrepublik Deutschland (einschließlich der DDR nach ihrem Beitritt) gelten sollen.

Zusätzlich muß berücksichtigt werden, daß die Bevölkerungszahl im Jahr 2005 durch nennenswerte Zuwanderungen aus Drittländern wesentlich höher liegen kann. Für den Fall, daß die angenommene Bevölkerungszahl der Bundesrepublik Deutschland bis zum Jahr 2005 wesentlich über dem gegenwärtigen Wert liegt, wäre dies mit einem entsprechend höheren Energieverbrauch und erhöhten Emissionen verbunden. Nach neueren Untersuchungen muß insgesamt damit gerechnet werden, daß die Bundesrepublik Deutschland (ohne Gebiet der ehemaligen DDR) im Jahr 2005 rund 63,5 Mio. Einwohner (Studie des Instituts der Deutschen Wirtschaft, IW, wobei die Zahl der Asylbewerber differenziert berücksichtigt werden muß) oder rund 65 Mio. Einwohner (Studie des Deutschen Instituts für Wirtschaftsforschung, DIW) hat. In internationalen und nationalen Verpflichtungen über die Höhe der Reduktionsziele muß diesem Umstand Rechnung getragen werden, zum Beispiel dadurch, daß innerhalb der Kriterien (vgl. 3. Kap., Nr. 2.2 und Abschnitt F), die der Festlegung der Reduktionsziele zugrundegelegt werden, den Pro-Kopf-Angaben entsprechende Bedeutung beigemessen wird.

Tabelle 7

**Reduktionsplan der Enquete-Kommission zur Verminderung der energiebedingten klimarelevanten Spurengasemissionen der Bundesrepublik Deutschland für das Jahr 2005 (verbindliches Reduktionsziel) sowie für die Jahre 2020 und 2050 (Zielorientierung)**

Spurengase	Ausgangswerte: Emissionen im Basis- jahr 1987 <sup>1)</sup> in Mio. t (gerundet)	Reduktions- ziel: Reduktion bis 2005 in % gegenüber 1987	Zielorien- tierung: Reduktion bis 2020 in % gegenüber 1987	Zielorien- tierung: Reduktion bis 2050 in % gegenüber 1987
Kohlendioxid (CO <sub>2</sub> ) .....	715	-30	-50	-80
Methan (CH <sub>4</sub> ) .....	1,8	-30	-50	-80
Stickoxide (NO <sub>x</sub> ) .....	2,6	-50	-70	-90
Kohlenmonoxid (CO) .....	8	-60	-75	-90
flüchtige organische Verbindungen ohne Methan (NMVOC) .....	1,5	-80	-90	-95

<sup>1)</sup> Die Ausgangswerte des Jahre 1987 sind aufgrund der exakteren Datenlage nur für die Bundesrepublik Deutschland (ohne ehemalige DDR) angegeben; die prozentualen Reduktionen beziehen sich auf die Bundesrepublik Deutschland einschließlich der ehemaligen DDR.

## 2. Zentrale Ergebnisse des Studienprogramms der Kommission zum Erreichen der Reduktionsziele

Im Hinblick auf Maßnahmen zum Erreichen der Reduktionsziele faßt die Enquete-Kommission die zentralen Ergebnisse des für sie erarbeiteten Studienprogramms im folgenden zusammenfassen (vgl. Tab. 8 und 9, Abb. 16 und 17 sowie Abschnitt E).

Die in den Studien für die Bundesrepublik Deutschland (ohne ehemalige DDR) ermittelten Reduktionspotentiale wurden in einer auf dem Studienprogramm aufbauenden, zusammenfassenden Energiestudie vergleichbar und addierbar gemacht. In drei Szenarien,

- dem Reduktionsszenario „Energiepolitik“, das die jetzige Kapazität der Kernkraft beibehält,

- dem Reduktionsszenario „Kernenergieausstieg“ und
- dem Reduktionsszenario „Kernenergieausbau“ wurden, aufbauend auf den unterschiedlichen Annahmen, die daraus folgenden Potentiale ermittelt.

Aus Tabelle 8 wird ersichtlich, daß sich bei den einzelnen Szenarien die Veränderungen bei den fossilen Energieträgern und den Kernbrennstoffen sowie der CO<sub>2</sub>-Emissionen unterschiedlich auf die einzelnen Endenergiesektoren und den Energieumwandlungssektor verteilen. So ergeben sich aufgrund der Vorgaben und der zugrunde gelegten Annahmen besonders hohe Emissionsreduktionen in den Endenergiesektoren beim Szenario „Kernenergieausstieg“, hingegen im Energieumwandlungssektor beim Szenario „Kernenergieausbau“. Dabei ist zu berücksichtigen, daß die

Tabelle 8

### CO<sub>2</sub>-Emissionen<sup>1)</sup> der Bundesrepublik Deutschland (ohne ehemalige DDR) im Basisjahr 1987 sowie im Jahr 2005, ausgewiesen nach Sektoren, in Millionen Tonnen

	Basisjahr 1987	Reduktionsszenarien im Jahr 2005		
		Energiepolitik	Kernenergieausstieg	Kernenergieausbau
<b>Endenergiesektoren:</b>				
Haushalte .....	113	52	41	62
Kleinverbrauch .....	60	36	24	40
Industrie <sup>2)</sup> .....	131	127	113	144
Verkehr .....	143	129	120	144
nicht behandelte Sektoren .....	6	9	5	5
Substitution durch Kraft-Wärme-Kopplung .....		-20	-29	-12
<b>Summe Endenergiesektoren .....</b>	<b>453</b>	<b>333</b>	<b>274</b>	<b>383</b>
<b>Energieumwandlungssektor:</b>				
Kraft-Wärme-Kopplung und Heizwerke .....	45	71	82	16
Sonst. Stromerzeugung .....	189	94	140	82
Sonst. Anteile d. Sektors und statist. Differenzen .....	28	12	14	14
<b>Summe Umwandlungssektor .....</b>	<b>262</b>	<b>177</b>	<b>236</b>	<b>112</b>
<b>Zwischensumme Endenergiesektoren und Umwandlungssektor .....</b>	<b>715</b>	<b>510</b>	<b>510</b>	<b>495</b>
<b>Reduktion in % .....</b>		<b>28,7</b>	<b>28,7</b>	<b>30,8</b>
Reduktion durch energiebewußtes Verhalten, in % gegenüber 1987 <sup>3)</sup> .....		5	5	5
<b>Gesamtsumme .....</b>	<b>715</b>	<b>474</b>	<b>474</b>	<b>459</b>
<b>Gesamtreduktion in % .....</b>		<b>33,7</b>	<b>33,7</b>	<b>35,8</b>

<sup>1)</sup> Endenergieseitig berechnet, einschließlich bundesdeutschem Anteil (ohne ehemalige DDR) am internationalen Flugverkehr, ohne nichtenergetischen Energieverbrauch

<sup>2)</sup> Inklusive der Brennstoffemissionen für eigenerzeugten und selbstverbrauchten Strom

<sup>3)</sup> Die Kommission verzichtet auf eine szenariospezifische Differenzierung des Beitrags durch energiebewußtes Verhalten und setzt bei allen Szenarien pauschal 5 Prozent des jeweiligen Wertes des Jahres 1987 an.

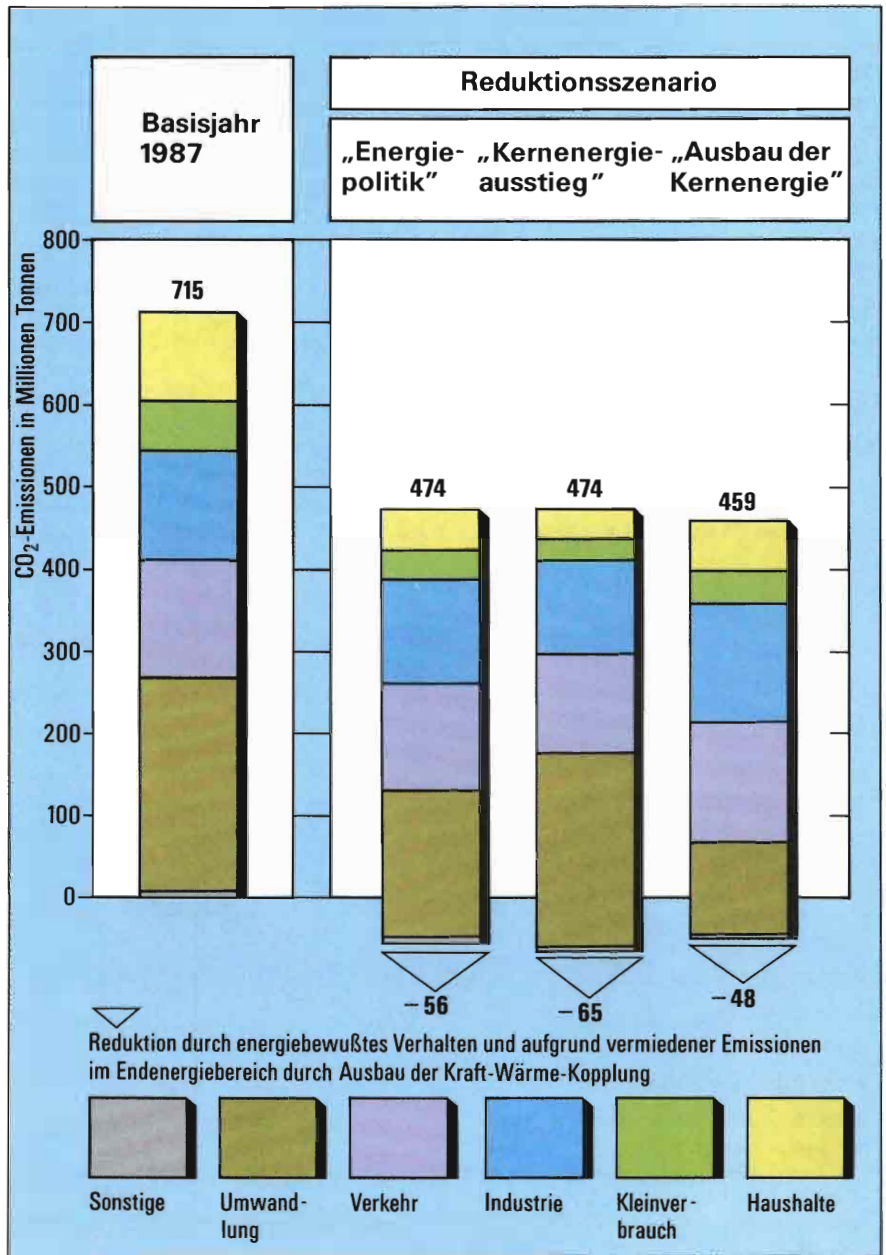


Abb. 16: Entwicklung der CO<sub>2</sub>-Emissionen der Bundesrepublik Deutschland (ohne ehemalige DDR) für das Basisjahr 1987 sowie für das Jahr 2005 in den drei Reduktionsszenarien „Energiepolitik“, „Kernenergieausstieg“ und „Kernenergieausbau“

Emissionsreduktionen in diesen Bereichen nicht unabhängig voneinander gesehen werden können, da Energieeinsparungen in den Endenergiesektoren auch zu Energie- und Emissionsreduktionen im vorgelagerten Energieumwandlungssektor führen.

Innerhalb der Endenergiesektoren wird deutlich, daß bei allen Szenarien die höchsten Emissionsreduktionspotentiale im Haushaltssektor und – mit etwas Abstand – im Kleinverbrauch (Handwerk, Dienstleistungen, öffentliche Einrichtungen, Landwirtschaft etc.) mobilisiert werden können. Dies ist Ausdruck des besonders hohen Emissionsreduktionspotentials im Raumwärmebereich und verdeutlicht die Notwendigkeit, auf diesem Gebiet vorrangig Maßnahmen einzuleiten.

Demgegenüber sinken die Emissionen in den Sektoren Industrie und Verkehr deutlich geringer bezie-

hungsweise weisen im Szenario „Kernenergieausbau“ einen geringen Anstieg auf. Ursache hierfür ist unter anderem das in allen Szenarien angenommene Wirtschaftswachstums von jährlich 2,4 Prozent sowie ein erheblicher Anstieg der Verkehrsleistungen.

Im Rahmen des Reduktionsszenarios „Kernenergieausbau“ ergäbe sich nach den darin enthaltenen Berechnungen bei weitergehenden Maßnahmen zur Emissionsreduktion (zum Beispiel einer intensiveren Anwendung der rationellen Energienutzung) eine höhere CO<sub>2</sub>-Reduktion als die hier ausgewiesene. Dies wird allerdings von einem Teil der Kommissionsmitglieder in Frage gestellt (vgl. Nr. 4.4 und Abschnitt E).

Alle drei Szenarien gelangen, wie aus Tabelle 8 ersichtlich, zu CO<sub>2</sub>-Reduktionswerten von über 30 Prozent. Allerdings unterscheiden sich die Eingriffstiefen

Tabelle 9

**Gesamter Energieverbrauch<sup>1)</sup> der Bundesrepublik Deutschland (ohne ehemalige DDR)  
für das Basisjahr 1987 und für das Jahr 2005, nach Energieträgern ausgewiesen, in Petajoule (PJ)<sup>2)</sup>**

Energieträger	1987 Basisjahr	Reduktionsszenarien 2005		
		Energie- politik	Kern- energie- ausstieg	Kern- energie- ausbau
Steinkohlen .....	1 878	1 155	1 404	1 092
Braunkohlen .....	1 016	617	548	453
Mineralölprodukte .....	4 060	2 552	1 857	2 725
Gase .....	2 250	2 709	3 331	2 620
Summe Fossil .....	9 204	7 033	7 140	6 890
Wasserkraft .....	184	220	215	214
Kernenergie .....	1 233	1 428	0	2 439
Windenergie .....	0	43	88	12,3
Photovoltaik .....	0	5	16	0,3
Stromimportsaldo etc. ....	36	36	32	34,2
erneuerbare Energiequellen im Endenergiebereich .....	135	523	740	320
Zwischensumme <sup>3)</sup> .....	10 792	9 288	8 231	9 910
Reduktion in % <sup>4)</sup> .....		13,9	23,7	8,2
Reduktion durch energiebewußtes Verhalten gegenüber 1987 <sup>5)</sup> .....		-540	-540	-540
Gesamtsumme <sup>2)</sup> .....	10 792	8 748	7 692	9 370
Gesamtreduktion in % <sup>4)</sup> .....		18,9	28,7	13,2

1) Abweichungen vom Primärenergieverbrauch durch Nichtberücksichtigung des nichtenergetischen Verbrauchs, des sonstigen Energieaußenhandels etc.

2) 1 Petajoule (PJ) = 1 Billiarde Joule (J) = 10<sup>15</sup> J = 0,278 Terawattstunden (TWh) = 34 000 Tonnen Steinkohleeinheiten (t SKE); 10 792 PJ = 367 Mio. t SKE

3) bewertet mit den substituierten Energieträgern

4) Aufgrund der Zielvorgabe einer CO<sub>2</sub>-Reduktion um 30 Prozent bis zum Jahr 2005 wurden für die Szenarien unterschiedlich intensive Maßnahmen angenommen, woraus Unterschiede in der Höhe der Energieeinsparung bei den verschiedenen Szenarien resultieren.

5) Die Kommission verzichtet auf eine szenariospezifische Differenzierung des Beitrags durch energiebewußtes Verhalten und setzt bei allen Szenarien pauschal 5 Prozent des jeweiligen Wertes des Jahres 1987 an.



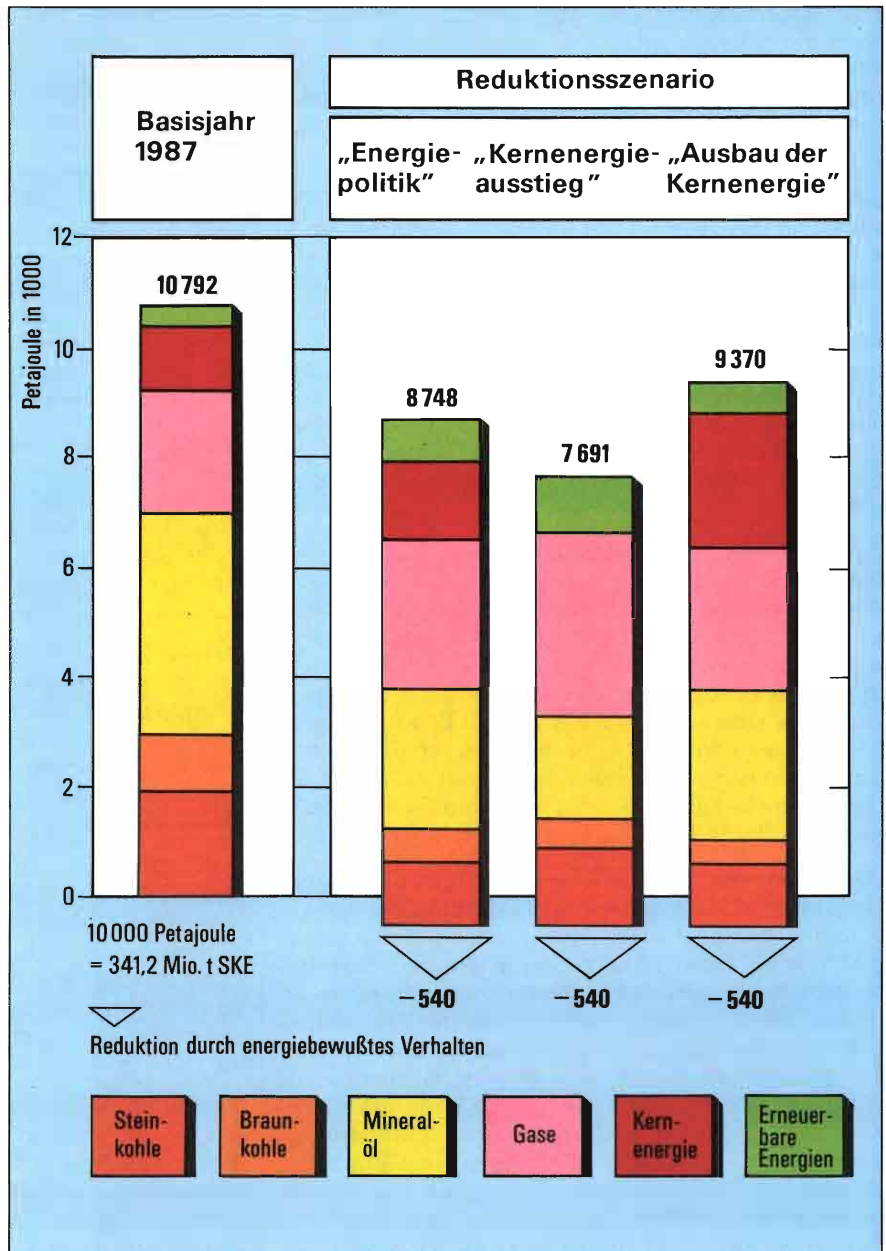


Abb. 17: Entwicklung des Energieverbrauchs der Bundesrepublik Deutschland (ohne ehemalige DDR) für das Basisjahr 1987 sowie für das Jahr 2005 in den drei Reduktionsszenarien „Energiepolitik“, „Kernenergieausstieg“ und „Kernenergieausbau“, ausgewiesen nach Energieträgern

in den verschiedenen Sektoren bei den drei Szenarien in den verschiedenen Sektoren erheblich (vgl. Abschnitt E).

Die Kommissionsmitglieder schätzen die Rolle der Kernenergie und damit korrespondierend die Eingriffsform und -tiefe der vorzunehmenden Maßnahmen in den verschiedenen Bereichen unterschiedlich ein. Weitere Ausführungen dazu wurden in Nr. 4.4 und Abschnitt E vorgenommen

Die Kommission kommt gemeinsam zu dem Ergebnis, daß – unabhängig von der Frage der Bewertung der Kernenergie – die Bundesrepublik Deutschland eine Reduktion der CO<sub>2</sub>-Emissionen um 30 Prozent bis zum Jahr 2005 erreichen kann. Sie sieht die Erfüllung dieses Reduktionsziels im Hinblick auf die Eindämmung

des Treibhauseffektes als notwendig an und weist ausdrücklich darauf hin, daß dabei Maßnahmen zur Energieeinsparung und zur Erhöhung der Energieeffizienz Priorität haben.

Tabelle 9 verdeutlicht die den einzelnen Szenarien zugrundegelegte Energieträgerstruktur.

Hierbei steigt der Gaseinsatz bei allen Szenarien gegenüber dem Jahr 1987, am stärksten beim Szenario „Kernenergieausstieg“ um 48 Prozent, im Szenario „Energiepolitik“ um 20 Prozent und im Szenario „Kernenergieausbau“ um 16 Prozent.

Der Einsatz von Mineralölprodukten vermindert sich im Szenario „Energiepolitik“ um 37 Prozent, im Szenario „Kernenergieausstieg“ um 54 Prozent und im Szenario „Kernenergieausbau“ um 33 Prozent.

Der Verbrauch von Stein- und Braunkohlen sinkt im Szenario „Energiepolitik“ um 38 beziehungsweise 39 Prozent, im Szenario „Kernenergieausstieg“ um 25 beziehungsweise 46 Prozent und im Szenario „Kernenergieausbau“ um 42 beziehungsweise 55 Prozent.

Entsprechend dem Aufbau der Szenarien ist die Entwicklung des Einsatzes von Kernbrennstoffen unterschiedlich: Das EnergiepolitikszENARIO geht von der Beibehaltung der derzeitigen Kapazität der Kernkraftwerke aus, wobei sich der Brennstoffeinsatz durch eine größere Auslastung der Kernkraftwerke um 16 Prozent erhöht. Beim Szenario „Ausstieg aus der Kernenergie“ sinkt der Brennstoffeinsatz bis zum Jahr des Ausstiegs auf Null. Beim Szenario „Ausbau der Nutzung der Kernenergie“ wird der Einsatz der Nuklearanlagen bis zum Jahr 2005 knapp verdoppelt.

Das Erreichen der Reduktionsziele erfordert schnelles und tiefgreifendes Handeln in allen Bereichen. Auf den Ergebnissen des Studienprogramms aufbauend, sieht die Kommission eine Vielzahl von Handlungsmöglichkeiten und Instrumenten, was unter anderem in den drei verschiedenen Reduktionsszenarien zum Ausdruck kommt (vgl. auch Abschnitt E). Es existieren verschiedene Wege, um durch unterschiedliche Kombinationen der Maßnahmen die Reduktionspotentiale der energiebedingten klimarelevanten Emissionen in der geforderten Höhe auszuschöpfen.

Die Kommission empfiehlt im folgenden einen Handlungsrahmen, der einerseits zur Erfüllung der Reduktionsziele geeignet ist und der andererseits den unterschiedlichen Gewichtungen der in den einzelnen Bereichen zu ergreifenden Maßnahmen Rechnung trägt. Dieses Vorgehen gewährleistet, daß die Empfehlungen von allen Kommissionsmitgliedern einvernehmlich getragen werden können. Es trägt darüber hinaus der geänderten Situation durch den Beitritt der DDR Rechnung. Wegen der anderen Energieträgerstruktur und anderer Ausgangsbedingungen im Gebiet der ehemaligen DDR ist es erforderlich, die Zusammensetzung der Reduktionsbeiträge in den einzelnen Energiesektoren und -bereichen auf der Basis einer fundierten Datengrundlage anzupassen.

### 3. Strategie zum Erreichen der Reduktionsziele:

Die von rund 50 Instituten in rund 150 Studien für die Enquete-Kommission im Hinblick auf die Bundesrepublik Deutschland (ohne ehemalige DDR) erarbeiteten Aussagen über Wege zum Erreichen der Reduktionsziele konnten in der Kürze der zur Verfügung stehenden Zeit im Hinblick auf die im einzelnen zu ergreifenden Maßnahmen auch nicht annähernd im Detail ausgewertet und im Lichte des Beitritts der DDR überarbeitet werden.

Die Enquete-Kommission ersucht daher den Deutschen Bundestag und die Bundesregierung, in der nächsten Wahlperiode eine Strategie zur Reduktion der energiebedingten klimarelevanten Spurengase-missionen auf der Basis fundierter Daten in bezug auf die ehemalige DDR an die Sachlage nach dem Beitritt

der DDR im einzelnen anzupassen und die einzuleitenden Maßnahmen weiter zu konkretisieren.

Nach einer ersten Auswertung der Studien der Enquete-Kommission zur Verminderung der CO<sub>2</sub>-Emissionen um 30 Prozent gegenüber dem Jahr 1987, sowie zur Reduktion der energiebedingten Emissionen von Methan um 30 Prozent, Stickoxiden um 50 Prozent, Kohlenmonoxid um 60 Prozent und von flüchtigen organischen Verbindungen (ohne Methan) um 80 Prozent für die Bundesrepublik Deutschland empfiehlt die Kommission, den gesetzlichen Rahmen zu überprüfen, gegebenenfalls anzupassen und geeignete Maßnahmen in die Wege zu leiten, damit die Reduktionsziele erreicht werden können.

Die Kommission empfiehlt, daß seitens der Bundesregierung bereits auf der Basis der gegenwärtigen Rechtslage weitreichende Sofortmaßnahmen in die Wege geleitet werden, die geeignet sind, in erheblichem Umfang einen Beitrag zur Erreichung der angestrebten Reduktionsziele, insbesondere auch der ins Auge zu fassenden Zwischenschritte, zu leisten.

Darüber hinaus wird die Bundesregierung ersucht, in den Bereichen, in denen auf der Basis der gegenwärtigen Gesetzeslage durch die Änderung bestehender Verordnungen erhebliche Beiträge auf dem Weg zu den vorgegebenen Reduktionszielen erzielt werden können, bis zum 1. September 1991 entsprechende Novellierungsentwürfe vorzulegen.

Darüber hinaus wird die Bundesregierung ersucht, dem Deutschen Bundestag bis zum 1. Dezember 1991 einen Bericht darüber zuzuleiten, welche Gesetzesänderungen notwendig sind, um den Handlungsrahmen dafür zu eröffnen, die angestrebten Reduktionsziele zu erreichen, und bis zum 1. Juli 1992 dem Deutschen Bundestag entsprechende Gesetzesentwürfe zuzuleiten.

Die erforderliche Energie-, Umwelt- und Verkehrs-gesetzgebung muß in einem dynamischen Prozeß auf der Basis eines differenzierten Maßnahmenbündels regelmäßig überprüft und den Erfordernissen angepaßt werden. Im Hinblick auf die angestrebten Reduktionsziele und die im folgenden genannten Grundsätze und Prioritäten sind dem Deutschen Bundestag alle zwei Jahre – beginnend mit dem 1. Dezember 1993 – Fortschrittsberichte vorzulegen.

Die in diesem Zusammenhang relevanten Gesetze, Verordnungen und Vorschriften der Energie-, Umwelt- und Verkehrspolitik sind im Hinblick auf die Erreichung der Reduktionsziele zu überprüfen, gegebenenfalls den genannten Erfordernissen anzupassen und um weitere geeignete Gesetze und ordnungspolitische Regelungen zu erweitern.

Dies betrifft zum Beispiel folgende Gesetze: das Energiewirtschaftsgesetz, das Energieeinspar-gesetz (EnEG), das Bundesimmissionsschutzgesetz (BImSchG), das 3. Verstromungsgesetz, das Sozialwohnungsbaugesetz, das Abfallgesetz, das Gemeindeverkehrsfinanzierungsgesetz und andere.

Ferner sind unter anderem folgende Verordnungen und Vorschriften betroffen: die Wärmeschutzverordnung (WSchVO), die Bundestarifordnungen für Elektrizität und Gas, die Abwärmenutzungsverordnung,

die Heizungsanlagenverordnung, die Verordnungen für Groß- und Kleinf Feuerungsanlagen sowie die TA-Luft und andere.

Dabei ist zu berücksichtigen, daß die Änderungen sowohl die Energieanbieter als auch die Energienutzer betreffen müssen. Die Energie-, Umwelt- und Verkehrsgesetzgebung und die Maßnahmenstruktur müssen diesem Umstand durch eine differenzierte und vielschichtige Ausgestaltung ordnungspolitisch, fiskalisch und preispolitisch entsprechen.

Die Kommission ist zu dem Ergebnis gelangt, daß ein Mischkonzept von Abgabelösungen, Anreizsystemen und sektorspezifischen Maßnahmenbündeln erforderlich ist, um die Reduktionsziele zu erreichen.

Die Kommission empfiehlt daher, zur Umsetzung der erforderlichen Maßnahmen ein entsprechendes Mischkonzept zu entwerfen, das die Elemente einer Abgabelösung (Sonderabgaben oder Steuern) auf nationaler Ebene – soweit dies im Rahmen der EG möglich ist – beziehungsweise auf europäischer Ebene mit Anreizsystemen und mit sektorspezifischen Maßnahmenbündeln verknüpft. Hierbei sollte das Mittelaufkommen aus den Abgaben schwerpunktmäßig für die Förderung der rationellen Energienutzung und -umwandlung (einschließlich der Kraft-Wärme-Kopplung) und die Nutzung erneuerbarer Energiequellen sowie für die im Rahmen einer internationalen Konvention entstehenden Zahlungsverpflichtungen verwendet werden.

Die Kommission ersucht die Bundesregierung, bis zum 1. Dezember 1991 einen Plan vorzulegen, der ein abgestimmtes Konzept von finanzpolitischen Maßnahmen für alle Energiesektoren im Hinblick auf das Erreichen der von der Kommission genannten Reduktionsziele bis zum Jahr 2005 enthält.

Die Kommission ersucht den Deutschen Bundestag und die Bundesregierung, geeignete Schritte zur Beseitigung derjenigen rechtlichen, institutionellen und strukturellen Hemmnisse zu unternehmen, die einzelwirtschaftlich rentablen Maßnahmen zur Emissionsminderung entgegenstehen. Hierbei ist auf Basis der von der Enquete-Kommission vorgenommenen Hemmnisanalyse ein Maßnahmenbündel zu konzipieren, das sich besonders auch auf den Gebieten der Informationsverbesserung und der Fort- und Weiterbildung sowie der Verbesserung der Kostenorientiertheit bei der Preisbildung leistungsgeladener Energieträger gegenseitig verstärkt.

In diesem Zusammenhang begrüßt es die Enquete-Kommission, daß der Bundesminister für Bildung und Wissenschaft eine breit angelegte Untersuchung zur Umsetzung der Empfehlungen der Kommission in das Bildungssystem unter Einbeziehung aller Bildungsbereiche – der allgemeinbildenden Schulen, der beruflichen Bildung, der Hochschulen und der Weiterbildung – durchgeführt hat. Die Kommission empfiehlt, auf der Basis der Ergebnisse dieser Studie zur Erreichung dieser Zielsetzung 1991 konkrete Maßnahmen zu ergreifen, diese Maßnahmen im Zusammenhang mit weiteren Untersuchungen zu konkretisieren und dem Deutschen Bundestag bis zum 1. Dezember 1993 über die Ergebnisse zu berichten, und verweist in diesem Zusammenhang auch auf den Bericht der En-

quete-Kommission „Zukünftige Bildungspolitik – Bildung 2000“.

Die Kommission empfiehlt den möglichst schnellen Ausbau beziehungsweise Aufbau von Institutionen, wie beispielsweise Energiesparagenturen mit einer Reihe regionaler Büros, die auf Bundes-, Länder- sowie regionaler und lokaler Ebene über die Möglichkeiten der Emissionsreduktion, der rationellen Energienutzung, energiebewußtes Verhalten und den Einsatz erneuerbarer Energien beraten sollen.

Diesen Institutionen wird eine Reihe von Aufgaben übertragen, die im wesentlichen katalytische Funktionen haben, um potentielle Investoren zu aktivieren und bestehende Organisationen (Kammern, Beratungsbüros etc.) zu unterstützen. Zu den Aufgaben gehören zum Beispiel: Verbesserung von Fortbildung, Information, Beratung, Motivation, Ansprache der verschiedenen Zielgruppen (Privatpersonen, öffentliche Einrichtungen, Gebietskörperschaften (Kreise, Kommunen etc.), Verbände, Träger von Fort- und Weiterbildung, Handwerk, Klein- sowie Mittel-Industrie etc.) sowie eine Intensivierung der Verbundforschung, insbesondere in der mittelständischen Wirtschaft. Diese Institutionen, zum Beispiel die Energiesparagenturen, sollen auch darauf hinwirken, daß regionale und lokale Energiekonzepte auf die Klimaproblematik ausgerichtet werden. Die Bundesregierung wird ersucht, dem Deutschen Bundestag bis zum 1. Dezember 1991 ein konkretes Konzept für die Einrichtung solcher Institutionen vorzulegen.

#### **4. Grundsätze und Prioritäten bei den Maßnahmen bezüglich der Energieträgerstruktur**

Im Hinblick auf die rationellere Energieverwendung und Energieeinsparung, die erneuerbaren Energien, die fossilen Energieträger und die Kernenergie sollen Einzelmaßnahmen, Maßnahmenprogramme sowie die Energie-, Umwelt- und Verkehrsgesetzgebung folgenden Grundsätzen und Prioritäten genügen:

##### **4.1 Energieeinsparung, verbesserte Energieeffizienz, rationellere Energieverwendung**

Energieeinsparung durch rationellere Energienutzung und -umwandlung sowie durch energiebewußtes Verhalten haben Priorität beim Erreichen der gesteckten Reduktionsziele.

Energieeinsparung und Verbesserung der Energieeffizienz werden hier, dem Stand der Diskussion entsprechend, grundsätzlich im Sinne des Energiedienstleistungskonzeptes verstanden. Das heißt, der sogenannte Energiebedarf ist auf eine Dienstleistung (zum Beispiel Raumtemperatur, Beleuchtung, Transport) gerichtet, die durch eine Kombination der Faktoren Energie, Kapital und technisches Wissen erbracht wird. Energieeinsparung wird hier als Oberbegriff verstanden: Er umfaßt sowohl die Minimierung des Energieeinsatzes für ein gegebenes Niveau von Energiedienstleistungen über die gesamte Prozeßkette –

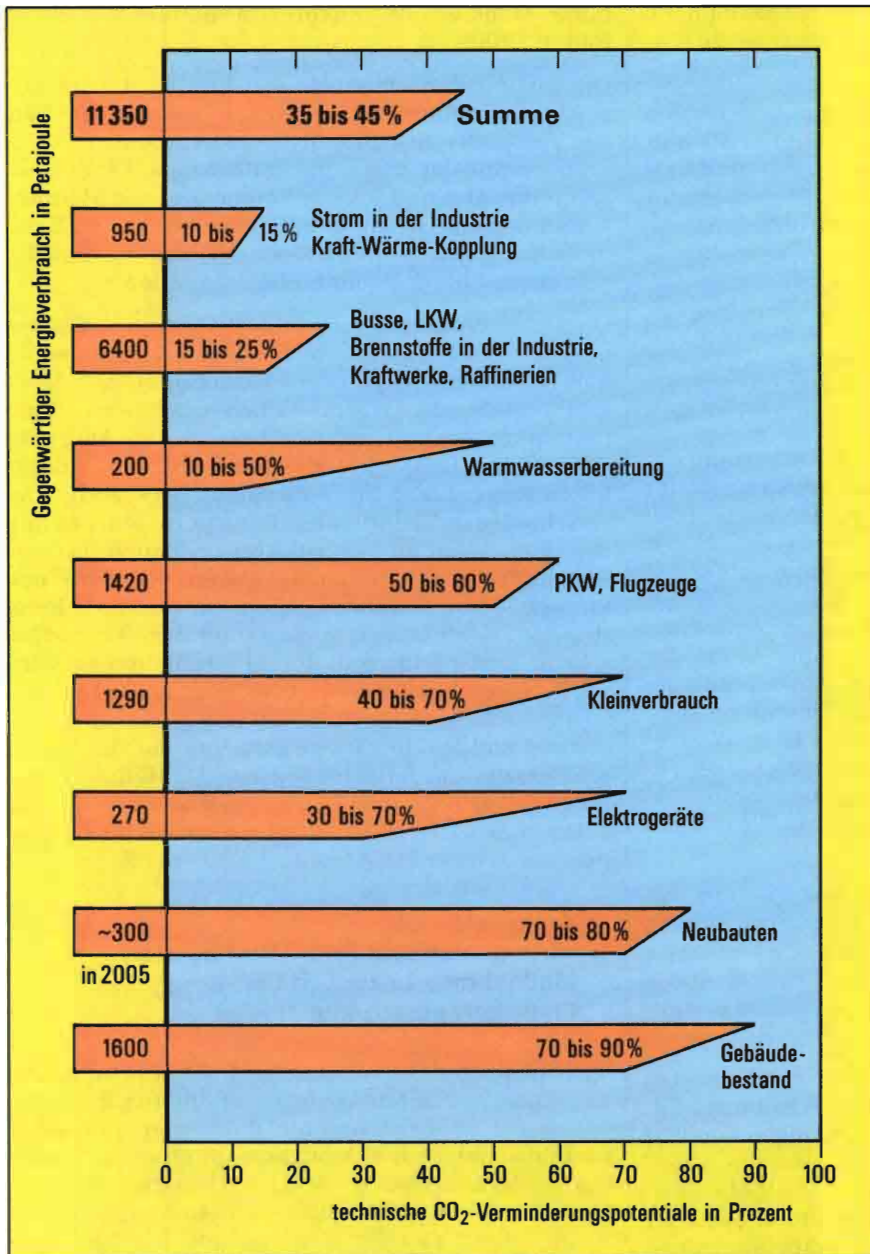


Abb. 18: Derzeitige technische CO<sub>2</sub>-Verminderungspotentiale durch rationellere Energieverwendung in der Bundesrepublik Deutschland (ohne ehemalige DDR); in Prozent, bezogen auf den Energieverbrauch des jeweiligen Anwendungsfeldes im Jahr 1987. Die spezifische Situation der ehemaligen DDR ist hierbei nicht berücksichtigt.

also einschließlich der Umwandlung von Primärenergie in Endenergie und deren Umwandlung in Nutzenergie beziehungsweise in die eigentliche Energiedienstleistung – als auch die Reduktion von Energiedienstleistungen. Aufmerksamkeit verdienen dabei sowohl die Angebots- als auch die Nachfrageseite.

In der Bundesrepublik Deutschland betrug im Jahr 1987 das Verhältnis von Primärenergie, Endenergie und Nutzenergie etwa 3 zu 2 zu 1; das heißt, nur etwa ein Drittel der Primärenergie beziehungsweise rund 45 Prozent der Endenergie wurden in Nutzenergie umgesetzt. Die eingesetzte Primärenergie bestimmt aber die Höhe der Emissionen. Die Industrie setzt rund 54 Prozent der Endenergie, die sie verbrauchte,

in Nutzenergie um, der Verkehr rund 17 Prozent, die Haushalte rund 58 Prozent und die Kleinverbraucher (Gewerbebetriebe, öffentliche Einrichtungen und andere) rund 48 Prozent.

Die Maßnahmen zur rationelleren Energieverwendung sollten daher eine möglichst weitgehende Ausschöpfung der technischen Potentiale anstreben, da sie die notwendige Voraussetzung dafür schaffen, daß trotz eines zukünftigen Wirtschaftswachstums der Energieeinsatz und die Emissionen nicht steigen, sondern erheblich reduziert werden.

Das in den Studien ermittelte technische CO<sub>2</sub>-Verminderungspotential (vgl. Abb. 18) beträgt derzeit

- beim Gebäudebestand 70 bis 90 Prozent,
- bei den Neubauten 70 bis 80 Prozent,
- im Sektor Kleinverbrauch 40 bis 70 Prozent,
- bei den Elektrogeräten 30 bis 70 Prozent,
- bei den PKW und Flugzeugen 50 bis 60 Prozent,
- bei der Warmwasserbereitung 10 bis 50 Prozent,
- bei Bussen, LKW, Brennstoffen in der Industrie, Kraftwerken und Raffinerien 15 bis 25 Prozent,
- bei der Kraft-Wärme-Kopplung und beim Strom in der Industrie 10 bis 15 Prozent.

Insgesamt ergibt sich bei dem derzeitigen Stand der Technik ein technisches CO<sub>2</sub>-Verminderungspotential in der Größenordnung von 35 bis 45 Prozent allein durch Maßnahmen der rationelleren Energieverwendung. Das technische Potential, das durch weitere Innovationen in Zukunft noch größer zu werden verspricht, weist ausdrücklich auf die Bedeutung möglichst großer Anstrengungen zur rationellen Energieverwendung hin. Das technische Potential ist allerdings nicht gleichzusetzen mit dem – geringeren – Potential, das aufgrund der Kosten, der Rahmenbedingungen, der Hemmnisse etc. bis zum Jahr 2005 ausgeschöpft werden kann.

Hinzu kommen ferner weitere Reduktionsmöglichkeiten, deren Emissions-Reduktionspotentiale im Studienprogramm nicht explizit ermittelt worden sind, wie zum Beispiel verbesserte interne und externe Wärmenutzung, abfallwirtschaftliche Maßnahmen zur Vermeidung und stofflichen Verwertung sowie systemoptimierende Strategien (vgl. Abschnitt E).

Insgesamt kommt die Kommission zu dem Ergebnis, daß ein CO<sub>2</sub>-Reduktions-Potential in der Größenordnung von mindestens 20 Prozent (addierbar zu weiteren Potentialen) bis zum Jahr 2005 durch Erhöhung der Energieeffizienz, rationelle Energieverwendung und energiebewußtes Verhalten erreicht werden kann.

Die Kommission geht davon aus, daß durch Energieeinsparung aufgrund von energiebewußtem Verhalten beziehungsweise der Reduktion von Energiedienstleistungen (zum Beispiel das Senken der Raumtemperatur von 22 auf 20 °C, die Wahl geeigneter Verkehrsmittel, soweit dies möglich ist, Recycling und anderes) ein CO<sub>2</sub>-Verminderungspotential von 5 bis 15 Prozent vorhanden ist. Sie ging bei der Ermittlung des 30-Prozent-Ziels von einer Reduktion in der Größenordnung von 5 Prozent durch energiebewußtes Verhalten bei allen drei Reduktionsszenarien aus, die addierbar zu den anderen Reduktionspotentialen ist.

## 4.2 Erneuerbare Energien

Maßnahmen zur verstärkten Nutzung der erneuerbaren Energien haben – insbesondere im Sinne energiepolitischer Langfristperspektiven – ebenfalls Priorität. Auch wenn ihr Einsatz trotz großer Anstrengungen bis zum Jahr 2005 zunächst nur einen begrenzten Beitrag an den Reduktionen erbringen wird, geht die

Kommission davon aus, daß diese Anstrengungen schon jetzt unternommen werden müssen, um dadurch erst die Voraussetzung dafür zu schaffen, daß die Nutzung der erneuerbaren Energien im Zeitraum nach 2005 wesentlich größere Anteile an der Energieversorgung und an den Reduktionszielen erlangen kann.

Bei der Nutzung der erneuerbaren Energien in größerem Umfang muß beachtet werden, daß sie gegenüber den Potentialen der rationelleren Energieverwendung zum Teil zeitversetzt zur Wirkung kommen. Unter der Zielvorgabe, daß bis zum Jahr 2050 weltweit eine Reduktion um etwa 50 Prozent erzielt werden muß, müssen die Potentiale der regenerativen Energien so weit wie möglich ausgeschöpft werden. Nach den Ergebnissen der für die Kommission erarbeiteten Studien können diese Potentiale von 2005 bis 2050 in etwa derselben Größenordnung liegen wie die der rationelleren Energieverwendung.

Damit die erneuerbaren Energien in ein bis zwei Jahrzehnten größere Beiträge leisten können, ist sicherzustellen, daß bereits heute nach einer gestaffelten Strategie sowohl die Erschließung des Marktes für einen Teil der erneuerbaren Energien als auch die Erforschung und Entwicklung eines anderen Teils der regenerativen Energietechniken und -systeme erheblich intensiviert werden.

Kleine und mittlere Windenergiekonverter, Wasserkraftanlagen, Biogasanlagen zur Fermentierung von landwirtschaftlichen Abfällen, Deponie- und Klärgas, solare Niedertemperaturanlagen und anderes können bereits heute in Serie produziert werden und schon kurzfristig zwar begrenzte, jedoch nicht zu vernachlässigende Marktanteile erreichen. Hier sind Maßnahmen zur Markterschließung entscheidend, wobei ein gewisser Forschungs- und Entwicklungs-Einsatz hilfreich sein kann, aber nicht entscheidend ist. Diese Techniken können im wesentlichen die erschließbaren Potentiale bis 2005 liefern.

Große Windenergieanlagen benötigen noch etwa ein Jahrzehnt Forschungs- und Entwicklungs-Arbeit, bis sie in größerem Umfang marktfähig sind. Allerdings stellen sich dabei – im Gegensatz zu kleinen und mittleren Anlagen – verstärkt Fragen nach dem Landschaftsbild, dem Geräuschpegel und demzufolge der Akzeptanz.

Anlagen zur Herstellung und Nutzung der Photovoltaik sowie Solarwasserstoff-Systeme benötigen eine Anlaufzeit von mehreren Jahrzehnten, bevor sie einen wesentlichen Anteil an der Energieversorgung ausmachen können. Ein paralleles Vorgehen von Markterschließung und Forschungs- und Entwicklungsarbeit ist hier besonders bedeutsam, wobei mit geeigneten Maßnahmen zur erhöhten Produktion und zum Einsatz von Photovoltaikanlagen unverzüglich begonnen werden muß (vgl. in diesem Zusammenhang auch den Bericht der Enquete-Kommission „Technikfolgen-Abschätzung und -Bewertung“ des Deutschen Bundestages).

Das Studienprogramm der Kommission hat sich auf die Nutzung der erneuerbaren Energien in der Bundesrepublik Deutschland beschränkt. Wegen der Möglichkeit von Energieimporten auf der Basis rege-

nerativer Energiequellen einerseits und der Exportchancen für solartechnische Anlagen andererseits ist es daher darüber hinaus bedeutsam, die erneuerbaren Energien im weltweiten Kontext zu sehen:

Die Sonnenenergie ist mit weitem Abstand die größte Energiequelle, zumal sie über den natürlichen Treibhauseffekt überhaupt erst ein für das Leben auf der Erdoberfläche geeignet hohes und ausgeglichenes Temperaturniveau schafft.

Der jährliche Primärenergieverbrauch der Menschheit, im Jahr 1987 rund  $90 \times 10^{12}$  Kilowattstunden (rund 330 Exajoule beziehungsweise 11 Milliarden Tonnen Steinkohleeinheiten), beträgt nur etwa ein Zehntausendstel der auf die Erdoberfläche jährlich einfallenden Sonnenstrahlung. Der Anteil der Landfläche an der Erdoberfläche beträgt etwa 30 Prozent, so daß die jährlich auf die Landfläche der Erde einfallende Sonnenstrahlung etwa das Dreitausendfache des derzeitigen Primärenergieverbrauchs der Welt beträgt.

Im Prinzip ist daher ein großes technisches Potential zur direkten und indirekten Nutzung von Solarenergie vorhanden: Würde man langfristig wenige Prozent der Landfläche der Erde, das heißt einige Millionen Quadratkilometer, für eine Energieumwandlung der Solarstrahlung mit einem Gesamtwirkungsgrad von durchschnittlich fünf Prozent (einschließlich aller Umwandlungs-, Verteilungs- und Speicherverluste) und zusätzlich einen Teil des technisch nutzbaren Potentials der Wasser- und Windkraft nutzen, so ließe sich das Zwei- bis Dreifache des heutigen globalen Primärenergiebedarfs mit regenerativen Energien decken. Dies bedeutet unter anderem, daß im Rahmen der weltweit notwendigen Strategien hier mit der Erschließung von besonders großen Potentialen und über Jahrzehnte hinweg mit großen Exportchancen zu rechnen ist, was für die nationale Strategie und die hier ansässige Wirtschaft von besonders großer Bedeutung ist.

Die Kommission empfiehlt nachdrücklich, die Nutzung der erneuerbaren Energien intensiv zu fördern. Dies betrifft unter anderem auch eine angemessene hohe Vergütung für regenerativ erzeugte Elektrizität sowie darüber hinaus weitere Förder- und Anreizprogramme.

### 4.3 Fossile Energieträger

Die fossilen Energieträger Erdgas, Erdöl und Kohle müssen so umweltfreundlich und insbesondere so klimaverträglich wie möglich genutzt werden. Ihre Nutzung muß so erfolgen, daß sie zu deutlichen Emissionsminderungen führt, wobei alle Maßnahmen im Hinblick auf den zukünftig zu erwartenden Wandel ein größtmögliches Maß an Flexibilität und Reversibilität aufweisen müssen.

Eine höhere Energieeffizienz bei der Verbrennung der fossilen Energieträger kann insbesondere durch modernere und im Wirkungsgrad verbesserte Kraftwerke sowie durch einen erhöhten Einsatz von Kraft-Wärme-Kopplungs-Anlagen erreicht werden.

Erdgas ist aufgrund der geringeren spezifischen CO<sub>2</sub>-Emission bei der Verbrennung im Vergleich zu Kohle und Erdöl geeignet, vorübergehend im größeren Umfang eingesetzt zu werden. Als limitierender Faktor muß dabei die mögliche Beschränkung der Importkapazität angesehen werden, die sich ergibt, wenn viele Staaten ihren Erdgaseinsatz erhöhen wollen, um den zusätzlichen Treibhauseffekt auf diese Weise einzudämmen. Die weltweiten Erdgasressourcen sind begrenzt, so daß eine verstärkte Nutzung des Erdgases nur als vorübergehende und mengenmäßig begrenzte Maßnahme zu sehen ist.

Die Kommission empfiehlt, den Erdölanteil an der Energieversorgung so schnell und so weit wie möglich zu reduzieren, zumal fast der gesamte Erdölbedarf importiert wird und Erdöl als Ausgangsstoff für den nichtenergetischen Verbrauch besonders geeignet ist. Eine Reduktion der Verbrennung von Mineralölprodukten betrifft insbesondere den Heizenergiebereich und den motorisierten Verkehr.

Der Einsatz von Steinkohle und Braunkohle ist erheblich zu reduzieren. Da sowohl Steinkohle als auch Braunkohle zu den heimischen Ressourcen gehören, die in größerem Umfang verfügbar sind, sind mit einem Rückgang des Einsatzes der Kohle arbeitsmarkt- und sozialpolitische Anpassungsprozesse von erheblichem Umfang verbunden. Die Kommission empfiehlt deshalb der Bundesregierung und den Ländern, in bezug auf die weitere Nutzung der Kohle intensive Untersuchungen unter Beachtung aller Aspekte durchzuführen. Dabei muß besonders der Aspekt berücksichtigt werden, daß der Anteil der Braunkohle an der Energieversorgung der DDR im Jahr 1987 rund 70 Prozent betrug und daß eine Strategie der zukünftig zu fördernden Braunkohlenmenge unter Berücksichtigung der neuen Energiesituation der Bundesrepublik Deutschland nach dem Beitritt der DDR entwickelt werden muß.

Die Kommission empfiehlt ferner Maßnahmen zur Verminderung der Methanemissionen, die bei der Förderung von Steinkohle (Grubengas) und Erdöl sowie bei der Förderung, dem Transport und der Verteilung von Erdgas entstehen.

### 4.4 Kernenergie

Über die Frage, ob und wieweit die Kernenergie weiter genutzt werden soll, gehen die Meinungen der Kommissionsmitglieder stark auseinander (vgl. dazu im einzelnen Abschnitt E).

a) Ein Teil der Mitglieder der Kommission vertritt die folgende Auffassung:

„Ob Kernenergie in Deutschland friedlich genutzt werden soll oder nicht, kann nicht losgelöst vom internationalen Kontext beurteilt werden. Diese Energie trägt zur weltweiten Energieversorgung mit 5 Prozent und zur weltweiten Stromversorgung mit 15 Prozent bei. In diesem Rahmen leistet sie bereits einen signifikanten Beitrag zur Erhaltung und Verbesserung des Klimas.“

Auch in Zukunft wird jedes Land selbstverantwortlich entscheiden, ob es Kernenergie für friedliche

Zwecke einsetzt oder nicht. Jedenfalls schließen diese Mitglieder aus, daß ein weltweiter Konsens auf Verzicht der Nutzung dieser Energie zustande kommt — etwa mit der Vorgabe, allein durch rationellere Energieverwendung und durch Einsatz von Erneuerbaren den schon wegen der Bevölkerungsexplosion steigenden Weltenergiebedarf zu decken. Hierfür spricht auch die sich weltweit abzeichnende Neubewertung der Kernenergie. Dies hat beispielsweise dazu geführt, daß Länder, die bereits den Ausstieg aus dieser Energie verbindlich festgelegt haben, daran denken, diesen Beschluß zu widerrufen.

Es ist verantwortbar, die Kernenergie in Deutschland längerfristig zu nutzen, dies umso mehr, als die Sicherheit der Kernenergienutzung auch im Wege der Nachrüstung in Betrieb befindlicher Anlagen weiterhin verbessert wird. Sichere Leichtwasser- und Hochtemperaturreaktoren werden entwickelt.

In dieser Perspektive könnte Deutschland nicht nur zur Vermeidung klimaschädlicher Emissionen beitragen, sondern anderen Ländern auch Technologien zur Verfügung stellen und damit erreichen, daß die Kernenergie weltweit sicherer wird.

Die Enquete-Kommission hat in einem umfassenden, an etwa 50 Institute unterschiedlicher Ausrichtung vergebenen Studienprogramm die Möglichkeiten einer Verringerung klimaschädlicher Emissionen untersucht. In der von den Studiennehmern akzeptierten zusammenfassenden Analyse wurden auch die Bedingungen und die Konsequenzen eines Verzichts der Bundesrepublik auf Kernenergie, sei es bis 2005, sei es bis 1995, geklärt. Diese Analyse zeigt, daß nur unter nicht vertretbaren Bedingungen und nicht zu verantwortenden Konsequenzen die CO<sub>2</sub>-Emissionen angemessen verringert und zugleich die Kernkraftwerke abgeschaltet werden können. Eine Reihe inzwischen eingetretener neuerer Entwicklungen wurde dabei noch nicht einmal berücksichtigt.

Einem Ausstieg Deutschlands aus der Kernenergie stehen darüber hinaus die folgenden Gründe entgegen:

- nach neueren Abschätzungen wird angenommen, daß die Bevölkerungszahl nicht — wie in den Studien zugrunde gelegt — abnehmen, sondern eher um mehrere Millionen zunehmen wird. Dies führte dann zu einem nicht in Rechnung gestellten Mehrverbrauch von Energie;
- die insbesondere nach Stilllegung aller Kernkraftwerke im Gebiet der DDR erwartete Lücke in der Stromversorgung wird nicht in Rechnung gestellt;
- ein Ausstieg erfordert aus Umweltschutzgründen, langzeitkonservierte Kohle- und Ölkraftwerke wieder in Betrieb zu nehmen;
- entgegen jeder Politik einer — zumal nach dem Irak-Konflikt gebotenen — Abkehr vom Öl müßte zusätzlich Heizöl in großen Mengen verstromt werden;

- es wäre — auch im Hinblick auf die internationale Situation — nicht möglich, kurz- und mittelfristig die Mengen an Erdgas aufzubringen, die zur Deckung des Strombedarfs dann erforderlich werden;
- angesichts des außerordentlichen Investitionsbedarfs zur Sanierung der Stromerzeugung im Gebiet der DDR wäre es kaum möglich, kurzfristig auch noch die Mittel aufzubringen, die zur Umstrukturierung des Kraftwerksparks bei einem Ausstieg erforderlich werden;
- es wird übersehen, daß es zu einem europäischen Binnenmarkt mit Freiverkehr für Energie einschließlich Strom kommen wird.

In dieser Lage sollten, sofern nicht sicherheitstechnische Bedenken entgegenstehen, die im Betrieb befindlichen Kernkraftwerke und deren Standorte erhalten bleiben (neue Standorte wären nicht erforderlich). Über einen Zubau sollte erst nach sorgfältiger Analyse der energie- und umweltpolitischen Erfordernisse entschieden werden: Strombedarfsentwicklung, Sicherstellung der Kohleförderung in einem klimaverträglichen Umfang, Verringerung der Emissionen, EG-Wettbewerbsfähigkeit des deutschen Stromangebots und Stromlieferungen in das Gebiet der DDR und osteuropäische Länder.“

Ein anderer Teil der Mitglieder der Kommission vertritt die folgende Auffassung:

„Es ist weder sachlich gerechtfertigt noch nachzuvollziehen, die zukünftig möglichen Gefahren aus der Veränderung des Treibhauseffektes gegen die bekannten Risiken und Langzeitwirkungen der Atomenergie auszuspielen. Auch die vorliegenden Studien belegen, daß eine wirksame Politik zum Schutz der Erdatmosphäre und der Ausstieg aus der Atomenergie vereinbar sind. Der Interpretation der Studien durch die Befürworter der Kernenergie in der Kommission, „daß nur unter nicht vertretbaren Bedingungen und nicht zu verantwortenden Konsequenzen die CO<sub>2</sub>-Emissionen angemessen verringert und zugleich die Kernkraftwerke abgeschaltet werden können“, wird deshalb nachdrücklich widersprochen. Notwendig — und bei einer entsprechend angelegten politischen Gestaltungsstrategie auch möglich — ist eine Industrie- und Energiepolitik, die beide Risiken Treibhauseffekt und radioaktive Verseuchung gleichzeitig verringert beziehungsweise beseitigt. Auch die großen Gefahren für das Weltklima dürfen Tschernobyl nicht vergessen lassen. Insofern ist es die politische Aufgabe, eine insgesamt risikominimierende und umweltverträgliche Strategie zu entwickeln und durchzusetzen.“

Von diesem Teil der Enquete-Kommission wird die Atomenergie aber nicht nur wegen ihrer unvertretbaren Risiken abgelehnt, sondern auch aufgrund ihrer spezifischen energiewirtschaftlichen, organisatorischen und technologischen Zwänge und Strukturwirkungen für das gesamte System der Energieversorgung. Denn es ist real nicht möglich, lediglich kohlenstoffhaltige Energieträger durch die angeblich „kohlenstofffreie Atomenergie“

auszutauschen und mit den ermittelten Einsparpotentialen zu kombinieren. Vielmehr müssen die systemaren Zusammenhänge jeweiliger Technologien und Systeme beachtet werden, ob sie zum Beispiel die effizientere Energienutzung, Kraft-Wärme-Koppelung oder Techniken auf der Basis regenerativer Energieträger fördern oder blockieren.

Bereits die bisherige Konzentration von Kapital, Know-how und Forschungsmitteln auf den Ausbau der Atomenergie hat die Entwicklung umweltverträglicherer und ökonomisch sinnvoller Alternativen gehemmt. Diese empirisch belegbare Aussage widerspricht der Behauptung, daß die Atomenergie einen wesentlichen Beitrag zur Klimastabilisierung geleistet habe und zukünftig noch stärker leisten könne.

Für den kurzen, aber entscheidenden Zeitraum notwendiger Maßnahmen zum Schutz der Erdatmosphäre bis zum Jahr 2005 blockiert gerade die Großtechnologie Atomenergie mit ihren betriebswirtschaftlichen Verwertungszwängen und ihrer geringen Effizienz den schnellen Umbau zu einer energieeffizienteren Gesellschaft. Der von der Enquete-Kommission geforderte Vorrang für die rationelle Energieverwendung ist auf diesem Weg nicht zu verwirklichen.

Eine auch international beispielgebende Energiepolitik ist notwendig, um das heutige System der Energieversorgung grundlegend zu reformieren. Dies schließt auch eine internationale Zusammenarbeit zur Verringerung der atomaren Risiken mit ein.“

Die Kommission verweist hierzu auf die Behandlung des Themas in Abschnitt E und empfiehlt, diesen Themenkomplex in einem sachlichen und diskursiven Verfahren weiter zu beraten.

## 5. Sektorspezifische Maßnahmen und Programme

Im Rahmen der von der Bundesregierung einzuleitenden Maßnahmen sowie der Überprüfung des zur Verfügung stehenden und an die Problemlage anzupassenden rechtlichen Instrumentariums empfiehlt die Kommission die Beachtung folgender sektorspezifischer Schwerpunkte:

### 5.1 Heizwärmebereich in allen Sektoren

Im Heizwärmebereich können gemäß dem Stand der Technik besonders hohe Reduktionen des Energieeinsatzes und der Spurengasemissionen erzielt werden. Die Kommission hält es für erforderlich, hier besonders große Anstrengungen zu unternehmen. Sie empfiehlt aufgrund der Ergebnisse des Studienprogramms, die CO<sub>2</sub>-Emissionen des Heizenergieeinsatzes in allen Endenergiesektoren bis zum Jahr 2005 um bis zu 40 Prozent zu vermindern.

Die Kommission hält aufgrund der Ergebnisse der für sie durchgeführten Studien besonders folgende Maßnahmen für erforderlich:

- Novellierung der Wärmeschutzverordnung aus dem Jahr 1982 mit dem Ziel, daß diese sich für den Zubau an Niedrigenergiehaus-Standards orientieren und nach einer zeitlich gestaffelten Strategie auch für den Baubestand gelten soll; ihr allgemeiner Geltungsbereich sollte sich auf alle Endenergiesektoren erstrecken;
- Schaffung spezieller Anreiz-, Finanzierungs- und Förderungsprogramme, insbesondere auch im Mietwohnungsbereich, auch für Beratung und berufliche Fortbildung, zur energetischen Optimierung von Neubauten sowie des Baubestandes und dessen stufenweiser Anpassung an die erhöhten Wärmedämmstandards der im obigen Sinne zu novellierenden Wärmeschutzverordnung;
- Schaffung zusätzlicher Anreiz-, Finanzierungs- und Förderungsprogramme für bauliche Maßnahmen, insbesondere auch im Mietwohnungsbereich, auf dem Gebiet der bisherigen DDR, um die Anforderungen der zu novellierenden Wärmeschutzverordnung auch dort erfüllen zu können. Die Bausubstanz auf dem Gebiet der ehemaligen DDR befindet sich in einem wesentlich schlechterem Zustand als die auf dem Gebiet der Bundesrepublik Deutschland vor dem Beitritt der DDR. Deshalb ist es besonders wichtig, daß alle baulichen Maßnahmen, die in den kommenden Jahren dort erfolgen, den Anforderungen der zu verschärfenden Wärmeschutzverordnung genügen. Würde dies unterlassen, wäre eine der größten Chancen zur Ausschöpfung von Reduktionspotentialen verpaßt, da Renovierungen von Gebäuden in der Regel in einem Zeitabstand von mehreren Jahrzehnten erfolgen;
- Einführung von Energiekennzahlen für alle Gebäude zur Erhöhung der Markttransparenz und Vergleichbarkeit des energetischen Zustandes von Gebäuden;
- besondere Förderung der passiven und aktiven Solarenergienutzung zur Verminderung des Wärmebedarfs sowie zur dezentralen Nutzung der Solarenergie, insbesondere auf Dächern;
- deutliche Steigerung des Nahwärme/Fernwärme-Anteils an der Wärmeversorgung auf der Basis von Kraft-Wärme-gekoppelten Anlagen;
- öffentliche Wohnungsbaumodernisierungsprogramme (ggf. gekoppelt mit Mietpreisbindung) mit dem Schwerpunkt der Energieeinsparung und Emissionsminderung;
- Neufassung der Heizungsanlagenverordnung und der Kleinfeuerungsanlagenverordnung mit dem Ziel einer möglichst weitreichenden Reduktion der Schadstoffemissionen und der Beschränkung von Ausnahmeregelungen auf das geringstmögliche Maß;
- Überarbeitung der technischen Normen im nationalen und EG-weiten Rahmen gemäß dem Stand der Technik mit Blick auf Energieeinsparung und ökologische Kriterien, insbesondere im Heizungs- und Baubereich;
- umfassende Information, Beratung und Motivationsbildung über die Notwendigkeit von Maßnahmen



men zur Verminderung des Heizwärmeeinsatzes, die Möglichkeiten von Anreiz-, Finanzierungs- und Förderprogrammen und die Bedeutung energiebewußten Nutzerverhaltens in privaten, öffentlichen und kommerziell genutzten Gebäuden; Ausbau und Neueinrichtung von Energieberatungsstellen, die flächendeckend, auch vor Ort, unabhängige Beratungen vornehmen;

- unverzügliche Anpassung der Lehrinhalte in Bildung und Ausbildung sowie Fort- und Weiterbildung, insbesondere bei Architekten, Planern, Ingenieuren, im Bau- und Heizungsgewerbe, der Bauindustrie und in der Erwachsenenbildung;
- Berücksichtigung der zur Energieeinsparung und Emissionsminderung im gebotenen Umfang notwendigen Gegebenheiten bei allen regionalen und kommunalen, mit dem Baubereich befaßten Behörden (Bauleitpläne etc.);
- Abstimmung der Modernisierung von Heizungsanlagen mit Maßnahmen des Wärmeschutzes, der Wärmedämmung und der passiven und aktiven Solarenergienutzung; Beratung zur Optimierung des Heizwärmesystems inklusive der kontrollierten Lüftung;
- Einleitung von Maßnahmen, die sicherstellen, daß der Heizenergieeinsatz, über die gesamte Energiekette berechnet, minimiert wird mit dem Ziel der Reduktion der Emissionen von klimarelevanten Spurengasen.

## 5.2 Verkehrssektor

Um die im Verkehrssektor im Trendfall zu erwartenden Emissionszuwächse<sup>1)</sup> abzufangen und darüber hinaus in Zukunft die Emissionen zu reduzieren, bedarf es einer umfassenden konzeptionellen Fortentwicklung des Verkehrsbereichs sowie einer Modernisierung der Verkehrstechnik mit abgestimmten fahrzeugtechnischen und verkehrsbeeinflussenden Maßnahmen.

Auf der Grundlage der Studien der Enquete-Kommission können Emissionsminderungspotentiale gemäß der zu erwartenden Entwicklung im Personen- wie im Güterverkehr insbesondere auf folgende Weise erreicht werden:

- Verkehrsvermeidung,
- Verminderung der zu erwartenden Verkehrsleistungen im Straßen- und Flugverkehr,
- Verlagerung von Verkehrsleistungen auf energieeffektivere und emissionsärmere Verkehrsmittel,
- umweltverträgliche Verkehrsabwicklung und Verbesserung der Verkehrsauslastung,

<sup>1)</sup> Bis zum Jahr 2005 ist, bezogen auf das Jahr 1987, im Trendfall, das heißt ohne spezifische Maßnahmen zur Reduktion der Treibhausgase, mit einer Erhöhung der CO<sub>2</sub>-Emissionen im Personen- und Güterverkehr um 21 bis 28 Prozent (je nach Basis der angenommenen Wohnbevölkerung) für das Gebiet der Bundesrepublik Deutschland (ohne ehemalige DDR) zu rechnen. Durch den Beitritt der DDR würden ohne spezifischen Maßnahmen die Schadstoffemissionen des Verkehrs noch erheblich stärker steigen.

- technische Energieeinsparung an Verkehrsmitteln (bei Herstellung und Gebrauch) sowie technische Maßnahmen zur Emissionsminderung und Schadstoffrückhaltung,
- Verhaltensänderungen.

Die Kommission weist ausdrücklich darauf hin, daß Maßnahmen zur Begrenzung des Verkehrs, insbesondere des Straßenverkehrswachstums, zugleich positive Auswirkungen auf die Emissionen von Stickoxiden, Kohlenmonoxid, flüchtigen organischen Verbindungen (ohne Methan) und Lärm haben sowie die sozialen und ökologischen Folgeschäden des Verkehrs (Auswirkungen auf die Gesundheit, auf Böden und Vegetation, Unfälle, Flächenverbrauch etc.) reduzieren.

Die Enquete-Kommission ersucht die Bundesregierung, aufbauend auf ihrem Studienprogramm bis zum 1. Dezember 1991 ein abgestimmtes Konzept für fahrzeugtechnische und verkehrsbeeinflussende Maßnahmen vorzulegen.

Die Kommission empfiehlt, im Verkehrssektor die Emissionsminderungspotentiale weitestgehend auszuschöpfen. Weiterhin sollen im Rahmen der zu erstellenden energiepolitischen Gesamtkonzeptionen wirksame preispolitische Maßnahmen zur Minderung verkehrsbedingter Schadgase konkretisiert werden.

Die Kommission weist darauf hin, daß bei der Erstellung dieses Verkehrskonzeptes eine möglichst weitgehende Internalisierung externer Kosten der Verkehrssysteme nach dem Verursacherprinzip von besonderer Wichtigkeit ist. Dies ist besonders vor dem Hintergrund der zukünftigen Liberalisierung des europäischen Binnenmarktes von Bedeutung. Die Verteilungseffekte derartiger preispolitischer Maßnahmen müssen dabei berücksichtigt werden.

Es muß darauf hingearbeitet werden, daß sowohl im Personenverkehr als auch im Güterverkehr möglichst schnell die größtmögliche Ausschöpfung der technischen Einspar- und Rückhaltepotentiale in allen Verkehrssystemen in die Wege geleitet werden.

Dies betrifft insbesondere die Entwicklung emissions- und verbrauchsarmer Fahrzeuge und Flugzeuge sowie die Verbesserung der Kraftstoffqualitäten für den Straßen- und Flugverkehr. Im Hinblick auf die klimarelevanten Schadstoffemissionen empfiehlt die Kommission die umfassende Einführung des Abgaskatalysators (bundesweit und EG weit) für PKW und LKW sowie geeigneter Rückhalteeinrichtungen für Dieselfahrzeuge, um die Emissionen von Stickoxiden, Kohlenmonoxid, flüchtigen organischen Verbindungen (ohne Methan), Staub und Ruß so weit wie möglich zu beschränken.

Die Kommission hält aufgrund der Ergebnisse der für sie durchgeführten Studien unter anderem Programme in folgenden Bereichen für notwendig:

Ordnungs- und Finanzpolitik:

- Schaffung und Erweiterung geeigneter ordnungsrechtlicher Instrumente, z. B.
  - Fortschreibung der Richtlinie 70/220 EWG zur Sicherstellung EG-weiter Grenzwerte bis 1992

- nach dem neuesten Stand der Abgasreinigungstechnik;
- Zulassungsvorschriften für Transportmittel zur Ausschöpfung technischer Einsparungs- und Rückhaltepotentiale (d. h. verschärfte Abgasvorschriften, besonders für LKW; Kraftstoffverbrauchsvorschriften; Geschwindigkeitsregler für LKW etc.);
  - Einschränkung des innerdeutschen Luftverkehrs durch Verlagerung auf die Schiene; dies gilt insbesondere für Flüge unterhalb 400 km, die in Konkurrenz zu bestehenden IC-Verbindungen stehen;
  - Verschärfung der Emissionsgrenzwerte für Flugzeuge;
  - Beschränkung der Standläufe von Flugzeugen;
  - Überprüfung der Möglichkeiten, Konzessionen im regionalen Flugverkehr einzuschränken;
  - Überprüfung der Möglichkeiten, Flüge in der Stratosphäre einzuschränken;
  - Sonderregelungen, zum Beispiel für Fahrzeuge des öffentlichen Personennahverkehrs und emissionsarme Fahrzeuge;
  - Verordnungen zum Abfallgesetz (Autoverschrottung).
- Förderrichtlinien, die eine ökologische Orientierung von Verkehrsplänen und Maßnahmen sicherstellen
- Novellierung des Verkehrswegerechts;
  - Novellierung des Gemeindeverkehrsfinanzierungsgesetzes;
  - Entkoppelung der Finanzierung des Öffentlichen Personennahverkehrs (ÖPNV) von den Energieerlösen im Rahmen eines öffentlichen Finanzierungsprogramms zur Steigerung der Attraktivität des ÖPNV.
- Auf Bundes- und Landesebene verkehrsträgerspezifische Steuern oder Sonderabgaben
- Aufhebung von Sondertarifen im regionalen Flugverkehr nach dem Beschluß des EG-Ministerrates vom Dezember 1987;
  - Umlegung der Flugsicherungskosten;
  - umweltgerechtere und stärker am Verursacherprinzip orientierte Besteuerung des KFZ-Verkehrs;
  - Verursachergerechte Wegekostenbelastung für Bahn und Straße;
  - Umwandlung der Kilometerpauschale in eine allgemeine Entfernungspauschale.
- Auf Gemeindeebene
- Die Enquete-Kommission appelliert an alle Gemeinden, entsprechende Maßnahmen zur Reduktion des Energieverbrauchs und der Schadstoffemissionen, ganz besonders im Verkehrsbereich, im Rahmen ihrer Möglichkeiten vorzunehmen. Die Kommission empfiehlt zu diesem Zweck, Energie- und Verkehrskonzepte zu erstellen und am Leitindikator „CO<sub>2</sub>-Reduktion“ zu orientieren.
- Investitionspolitik:**
- Auf Bundesebene höhere Investitionen zur Förderung des umweltfreundlichen Verkehrs
    - Erweiterung der Kapazität der Bahn;
    - zügiger Ausbau des europäischen Hochgeschwindigkeits-Schienenetzes als Alternative zum Luft- und Straßenverkehr und Einbindung von Flughäfen in dieses Netz;
    - Übernahme der Fahrwegkosten der Bahn durch den Bund;
    - Ausbau des kombinierten Straßen- und Bahn-Güterverkehrs.
  - Auf Bund-, Länder- und Gemeindeebene Förderung der
    - Investitionen zur Verstetigung des Verkehrsflusses: Allgemeine Einführung von Verkehrsleitsystemen auf Straßen und Flugleitsystemen zur Optimierung von Starts und Landungen;
    - Bau unabhängiger Streckenführungen und Einsatz von Betriebsleitsystemen im öffentlichen Personennahverkehr;
    - kombinierter Personenverkehr, zum Beispiel Park & Ride, Umweltabonnements, Einsatz von Kleinbussen und Taxen;
    - Förderung des nichtmotorisierten Verkehrs für Kurzstrecken, zum Beispiel Ausbau von Radwegen, Ausbau verkehrsberuhigter Zonen.
- Anreize zu Verhaltensänderungen:**
- Werbekampagnen zu ökologischem Verkehrsverhalten, Aufklärung über die Umweltbelastung durch den Verkehr;
  - Umwelt- und Verkehrserziehung (Aufklärung und Motivation) zur Erhöhung der sozialen Akzeptanz des Verzichtes auf Energiedienstleistungen, wo dies möglich ist.
- Siedlungs- und Raumplanung:**
- Als langfristige Maßnahme empfiehlt die Enquete-Kommission Veränderungen von Siedlungsstrukturen und Raumnutzungsplänen, die geeignet sind, den Energieeinsatz, die Schadstoffemissionen und andere ökologische Belastungen des Verkehrs zu vermindern.
- Die Enquete-Kommission hält eine den oben genannten Maßnahmen entsprechende „integrierte umweltgerechte Verkehrsplanung“ für unabdingbar.
- Das bedeutet, daß verkehrsträgerübergreifend unter Beteiligung aller relevanten Politikbereiche integrierte Verkehrsentwicklungspläne erarbeitet und im Hinblick auf die Reduzierung verkehrsbedingter Schadgasemissionen erstellt und umgesetzt werden sollen.
- Hierbei sind Vorgaben unter anderem aus den Bereichen Umwelt und Energiepolitik sowie Raumordnung

und Städtebau bei der Entwicklung von Maßnahmenkonzepten zu berücksichtigen. Auf allen Ebenen (Bund, Länder und Gemeinden) sind neue, umweltorientierte Verkehrsentwicklungspläne zu erstellen.

Daraus ergibt sich, daß Verkehrsmaßnahmen auf den oben genannten Ebenen nur verabschiedet (und demnach finanziert) werden können, wenn sie aus den oben definierten umweltgerechten Verkehrsentwicklungsplänen abgeleitet worden sind.

Dies erfordert eine entsprechende ökologische Orientierung der Bundesverkehrswegeplanung sowie ein umweltfreundliches europaweites Verkehrskonzept.

### 5.3 Industrie und Kleinverbrauch

Die Kommission empfiehlt, intensive Anstrengungen zur rationelleren Energieverwendung in den Sektoren Industrie und Kleinverbrauch (Handwerk, Dienstleistungsbereich, öffentliche Einrichtungen, Organisationen ohne Erwerbscharakter, Landwirtschaft etc.) zu unternehmen, um durch eine Vielfalt spezifischer Maßnahmen die Emissionen aufgrund des anzunehmenden zukünftigen Wirtschaftswachstums abzufangen und darüber hinaus zu reduzieren.

Aufgrund der Inhomogenität der beiden Energiesektoren sieht es die Kommission in diesem Rahmen nicht als sinnvoll an, Detailangaben zu Maßnahmen der Emissionsreduktionen angesichts der Vielzahl der verschiedenen Verfahren und Produkte anzugeben. Sie verweist hierbei auf Abschnitt E, 4. und 5. Kapitel sowie auf die einzelnen Arbeiten des Studienprogramms.

Im Hinblick auf übergreifende Reduktionsmöglichkeiten ersucht die Kommission die Bundesregierung,

- eine umfassende Ausgestaltung des Wärmenutzungsgebotes nach dem Bundesimmissionsschutzgesetz (BImSchG) durchzuführen,
- die Rahmenbedingungen für industrielle Kraft-Wärme-Kopplung (Eigenerzeugung) zu optimieren und
- ökonomisch attraktive Einspeisevergütungen von in der Industrie und im Kleinverbrauch eigenerzeugtem Strom aus Kraft-Wärme-Kopplungsanlagen und Anlagen zur Nutzung der erneuerbaren Energie vorzusehen.

Die Enquete-Kommission hält es für notwendig, in der Industrie, den Betrieben und Einrichtungen des Kleinverbrauchssektors sowie korrespondierend bei den Verbrauchern durch eine Vielzahl geeigneter Maßnahmen und Kaufentscheidungen den Energieeinsatz und die Schadstoffemissionen zu vermindern, zum Beispiel durch:

- Erstellung betrieblicher Energiekonzepte;
- Durchführung von Produktlinienanalysen über die gesamte Produktions- und Energiekette einschließlich vor- und nachgelagerter Bereiche;

- Herstellung und Verwendung von Produkten und Anwendung von Verfahren, die geeignet für Wiederverwendung oder Wiederverwertung sind;
- Höchstgrenzen, Effizienzstandards und Kennzeichnungspflicht beim Energieverbrauch von Massenprodukten, insbesondere von Elektrogeräten, wobei die Standards regelmäßig dem Stand der Technik angepaßt werden (Dynamisierung und Anpassung der Normen); dies soll allerdings nicht implizieren, daß in Benutzung befindliche Geräte vorzeitig aus dem Verkehr gezogen werden;
- Verbesserung der Informationen über den Energieverbrauch von Produkten, höhere Transparenz bei der Deklaration des Energieverbrauchs, stärkere Zusammenarbeit von Wirtschaft und Verbraucher- sowie Energieberatungsstellen;
- innerbetriebliche und außerbetriebliche Information, Weiter- und Fortbildung.

### 5.4 Energieumwandlungssektor

Die Enquete-Kommission ersucht die Bundesregierung, geeignete Schritte zu unternehmen, damit die Energiewirtschaft durch Verbesserung der Energieeffizienz erhebliche Reduktionen der Emissionen der klimarelevanten Spurengase bei der Energieumwandlung und -bereitstellung, insbesondere bei der Verbrennung der fossilen Energieträger, erzielt.

Dies betrifft zum einen den rechtlichen Rahmen (vgl. Nr. 3) und zum anderen die Verantwortung und Leistungsbereitschaft der Energiewirtschaft.

Die Kommission nennt einige Elemente für eine solchermaßen zu entwickelnde Strategie:

- Erstellung von Emissionsreduktionsplänen seitens der Energiewirtschaft;
- verstärkte Anwendung der Kraft-Wärme-Kopplung, vertragliche Vereinbarungen zur Abnahme des in diesen Anlagen, zum Beispiel in der Industrie, erzeugten Stroms und Ausbau der Nah/Fernwärme-Versorgung;
- erheblich stärkere Nutzung erneuerbarer Energien zur Stromerzeugung in Anlagen der Elektrizitätswirtschaft und im Kundenbereich;
- Optimierung der Reduktionspotentiale durch gezielte Informationen, Beratung, Investitionsangebote, Finanzierungshilfen im Kundenbereich, Contracting- und Drittfinanzierungsmodellen und so weiter im Sinne einer Minimalkostenplanung und eines energiedienstleistungsbezogenen Unternehmenskonzeptes;
- Überprüfung der Strom- und Erdgasstarife und der Vertragsausgestaltung für Sonderabnehmer und Weiterverteiler im Hinblick auf die Erhöhung der Transparenz und ein Anreizsystem zur Energieeinsparung;

- Verbesserung des Wirkungsgrades von Kraftwerken beziehungsweise Heizkraftwerken;
- Ausschöpfung von Energieeinspar- und Emissionsminderungspotentialen im Raffineriebereich der Mineralölwirtschaft;
- Minimierung der Methan-Emissionen bei der Förderung von Steinkohle, Erdöl und Erdgas sowie Vermeidung von Leckageverlusten beim Transport und der Verteilung von Erdgas; weitestgehende energetische Nutzung von Grubengas im Steinkohlenbergbau; Systematische energetische Nutzung von Deponiegas.

## 5. KAPITEL

### Empfehlungen zur Fortführung der Arbeit der Enquete-Kommission in der nächsten Wahlperiode

Die Kommission betrachtet ihre Arbeit mit den vorgelegten Handlungsempfehlungen nicht als abgeschlossen. Wegen der Komplexität des Problembereichs, der außerordentlich tiefgehenden und umfangreichen, im einzelnen noch zu erarbeitenden internationalen und nationalen Maßnahmen und der im Hinblick auf den Beitritt der DDR sich für die nationalen Strategien ergebenden neuen Situation empfiehlt die Kommission dem Deutschen Bundestag, auch in der nächsten Wahlperiode eine Enquete-Kommission zum Schutz der Erdatmosphäre einzusetzen und damit die Arbeit des Bundestages zu dieser ersten weltweiten Herausforderung mit der gebotenen Intensität weiterzuführen.

Die Kommission schlägt dem Deutschen Bundestag vor, in der nächsten Wahlperiode die Arbeit zum Schutz der Erdatmosphäre mit folgenden Schwerpunkten fortzusetzen:

- Vertiefung der Erarbeitung nationaler Umsetzungsmaßnahmen in den Endenergiesektoren Verkehr, Haushalte, Kleinverbrauch (Handwerk, Dienstleistungsbereich, öffentliche Einrichtungen etc.), Industrie sowie im Energieumwandlungssektor im Rahmen des in diesem Bericht vorgeschlagenen Reduktionsplans in der nächsten Wahlperiode. Dies ist besonders unter dem Gesichtspunkt des Beitritts der DDR notwendig. Die vorzusehenden Strategien sollen dabei, auf den Ergebnissen des Studienprogramms der Enquete-Kommission aufbauend, weiter konkretisiert werden. Dies liegt im Interesse einer sachgerechten Klärung energie-, verkehrs-, wirtschafts-, umwelt- und gesellschaftspolitischer Grundfragen.

Die Kommission empfiehlt weiterhin, in der nächsten Wahlperiode folgende Themenkomplexe zu bearbeiten:

- Landwirtschaft – Klima – Erdatmosphäre;
- aktueller wissenschaftlicher Sachstand zu den Veränderungen der Erdatmosphäre – insbesondere auch unter Beachtung der Chemie der Atmosphäre – und den Wechselwirkungen mit der Biosphäre;
- mögliche Auswirkungen der Klimaänderungen;
- Konkretisierung möglicher Maßnahmen auf nationaler, EG-weiter und weltweiter Ebene zur Eindämmung des zusätzlichen Treibhauseffektes so-

wie eventuell notwendig werdende Maßnahmen zur Verminderung von Folgeschäden der Klimaänderung;

- Verbesserung der Zusammenarbeit zwischen Industrieländern und Entwicklungsländern zur gemeinsamen Beratung der Problematik unter besonderer Berücksichtigung des Technologietransfers und einer bedarfsgerechten Technikentwicklung in den Entwicklungsländern;
- Bedeutung der Wechselwirkungen zwischen den zu erwartenden Klimaänderungen einschließlich ihrer Folgewirkungen und den Fragen der internationalen Sicherheit und Konfliktforschung.

## 6. Tabellenverzeichnis

Tab. 1: Prozentuale Anteile der Treibhausgase weltweit am zusätzlichen Treibhauseffekt bezüglich ihrer Konzentration

Tab. 2: Derzeitige Anteile der verschiedenen Verursacherbereiche weltweit am zusätzlichen, anthropogen bedingten Treibhauseffekt

Tab. 3: Energiebedingte CO<sub>2</sub>-Emissionen, Anteile an den weltweiten CO<sub>2</sub>-Emissionen und CO<sub>2</sub>-Emissionen pro Kopf für das Jahr 1986 für die größten Emittenten

Tab. 4: Reduktionsziele der Enquete-Kommission zur Verminderung der energiebedingten CO<sub>2</sub>-Emissionen bis zu den Jahren 2005 und 2050. Angaben in Prozent, bezogen auf die Emissionen der jeweiligen Ländergruppen im Jahr 1987

Tab. 5: Zeitplan für die Umsetzung der von der Enquete-Kommission vorgeschlagenen Gesamtstrategie zum Schutz der Erdatmosphäre

Tab. 6: Reduktionsplan der Enquete-Kommission zur Verringerung der CO<sub>2</sub>-Emissionen der Bundesrepublik Deutschland für das Jahr 2005 (verbindliches Reduktionsziel) sowie Zielorientierungen für die Jahre 2020 und 2050

Tab. 7: Reduktionsplan der Enquete-Kommission zur Verminderung der energiebedingten klimarelevanten Spurengasemissionen der Bundesrepublik Deutschland für das Jahr 2005 (verbindliches Reduktionsziel) sowie für die Jahre 2020 und 2050 (Zielorientierung)

Tab. 8: CO<sub>2</sub>-Emissionen der Bundesrepublik Deutschland (ohne ehemalige DDR) im Basisjahr 1987 sowie im Jahr 2005, ausgewiesen nach Sektoren, in Millionen Tonnen.

Tab. 9: Gesamter Energieverbrauch der Bundesrepublik Deutschland (ohne ehemalige DDR) für das Basisjahr 1987 und für das Jahr 2005, nach Energieträgern ausgewiesen

## 7. Abbildungsverzeichnis

Abb. 1: Strahlungshaushalt des Systems Erde – Atmosphäre

Abb. 2: Temperaturerhöhung seit der letzten Eiszeit (seit 18 000 Jahren) und zu erwartende Temperaturerhöhungen gegenüber dem vorindustriellen Wert bei einer Trendfortführung der gegenwärtigen Raten der Spurengasemissionen bis zu den Jahren 2025 und 2100

Abb. 3: Ursachen des zusätzlichen Treibhauseffektes: Anteile durch die Bereiche, die zuvor erläutert sind

Abb. 4: Energiebedingte CO<sub>2</sub>-Emissionen der größten Emittenten und Emissionen pro Kopf im Jahr 1986 in Millionen Tonnen bzw. in Tonnen CO<sub>2</sub> per capita

Abb. 5: Prozentualer Anteil einzelner Staaten an den weltweiten energiebedingten Kohlendioxidemissionen im Jahr 1986

Abb. 6: Pro-Kopf-Emissionen einzelner Staaten in bezug auf die im Jahr 1986 pro Einwohner emittierten Tonnen energiebedingter Kohlendioxidemissionen

Abb. 7: Satellitenaufnahmen des Ozonlochs über der Antarktis am 3. Oktober 1987 und 1989

Abb. 8: Veränderungen der Gesamtozonmenge in verschiedenen geographischen Regionen

Abb. 9: Rückkopplungen zwischen erhöhter UV-B-Strahlung und Treibhauseffekt-Auswirkungen auf die Biosphäre

Abb. 10: Zusammenhänge der Tropenwaldvernichtung

Abb. 11: Stufenplan der Enquete-Kommission zur weltweiten, EG-weiten und nationalen Reduktion der Fluorchlorkohlenwasserstoffe (FCKW), Halone sowie der Ver-

bindungen Tetrachlorkohlenstoff (CCl<sub>4</sub>), Methylchloroform (CH<sub>3</sub>CCl<sub>3</sub>) und teilhalogenerter FCKW im Vergleich zu den Regelungen des Montrealer Protokolls und den auf der zweiten Vertragsstaatenkonferenz in London getroffenen Vereinbarungen. Diese Verbindungen verursachen die Ozonzerstörung in der Stratosphäre und tragen zusätzlich zum anthropogenen Treibhauseffekt bei.

Abb. 12: Energiebedingte CO<sub>2</sub>-Emissionen bis zu den Jahren 2005 und 2050 nach dem Reduktionsplan der Enquete-Kommission: Reduktionsziele für die Industrieländer und Ziele für die Begrenzung der Zuwächse von Emissionen in den Entwicklungsländern

Abb. 13: Relative Veränderungen der energiebedingten CO<sub>2</sub>-Emissionen und mögliche Aufteilung der Reduktionsanteile für Industrieländer (westliche und östliche Industrieländer zusammen) und Entwicklungsländer (einschließlich der Volksrepublik China) für angenommene weltweite Reduktionsziele von 5 Prozent, 10 Prozent und 20 Prozent bis zum Jahr 2005, bezogen auf das Jahr 1987 mit dem Wert 1

Abb. 14: Energiebedingte CO<sub>2</sub>-Emissionen der EG-Mitgliedstaaten und der EG insgesamt, in Millionen Tonnen CO<sub>2</sub> und in Tonnen CO<sub>2</sub> pro Kopf im Jahr 1986

Abb. 15: Vertragswerk zum Schutz der Erdatmosphäre

Abb. 16: Entwicklung der CO<sub>2</sub>-Emissionen der Bundesrepublik Deutschland (ohne ehemalige DDR) für das Basisjahr 1987 sowie für das Jahr 2005 in den drei Reduktionsszenarien „Energiepolitik“, „Kernenergieausstieg“ und „Kernenergieausbau“

Abb. 17: Entwicklung des Energieverbrauchs der Bundesrepublik Deutschland (ohne ehemalige DDR) für das Basisjahr 1987 sowie für das Jahr 2005 in den drei Reduktionsszenarien „Energiepolitik“, „Kernenergieausstieg“ und „Kernenergieausbau“, ausgewiesen nach Energieträgern

Abb. 18: Derzeitige technische CO<sub>2</sub>-Verminderungspotentiale durch rationellere Energieverwendung in der Bundesrepublik Deutschland (ohne ehemalige DDR); in Prozent, bezogen auf den Energieverbrauch des jeweiligen Anwendungsfeldes im Jahr 1987.

## ABSCHNITT B

### Aufgabenstellung und bisherige Arbeit der Kommission

#### 1. KAPITEL

#### Problembeschreibung, Entstehung und Auftrag der Kommission

In den vergangenen Jahren hat sich die Diskussion um das Problem des Ozonabbaus in der Stratosphäre sowie der weltweiten Klimaänderungen und des Treibhauseffektes sowohl in der Wissenschaft als auch in der Politik und der Öffentlichkeit zunehmend verstärkt.

Dies ist durch sich immer stärker verdichtende wissenschaftliche Erkenntnisse über Ursachen und Ausmaß der mit den Phänomenen des Ozonabbaus in der Stratosphäre und des Treibhauseffektes verbundenen Schäden bedingt.

Vor diesem Hintergrund hat der Bundeskanzler in seiner Regierungserklärung vom 18. März 1987 (1) auf zunehmende globale Gefährdungen der Erdatmosphäre und auf die Notwendigkeit nationaler und internationaler Maßnahmen in diesem Bereich hingewiesen. Die Fraktionen der CDU/CSU und der FDP haben am 24. Juni 1987 beim Deutschen Bundestag den Antrag gestellt, eine Enquete-Kommission „Vorsorge zum Schutz der Erdatmosphäre“ zur parlamentarischen Diskussion möglicher Vorsorgemaßnahmen gegen die vom Menschen verursachten Veränderungen in der Erdatmosphäre und deren Auswirkungen auf das Weltklima und die Umwelt einzusetzen (2).

Diese Kommission sollte die Aufgabe haben, eine Bestandsaufnahme über die globalen Veränderungen der Erdatmosphäre vorzunehmen und den Stand der Ursachen- und Wirkungsforschung festzustellen sowie mögliche nationale und internationale Vorsorge- und Gegenmaßnahmen zum Schutz von Mensch und Umwelt vorzuschlagen.

Insbesondere sollte sie Untersuchungen zu einer Reihe von Fragestellungen durchführen.

Dazu gehörten

- Umfang und Ursachen des befürchteten Ozonabbaus in der Stratosphäre,
- Ausmaß und Ursachen möglicher globaler Temperaturveränderungen,
- Auswirkungen

- des Ozonabbaus und des sogenannten Treibhauseffektes,
- der Schadstoffemissionen, wie z. B. halogenierte Kohlenwasserstoffe,
- der Abholzung von Regenwäldern und der Übernutzung der Vegetation in Trockengebieten auf atmosphärische Vorgänge,
- der Kohlendioxidanreicherung der Erdatmosphäre,
- der zunehmenden Meeresverschmutzung auf den Kohlendioxidkreislauf,
- mögliche Vorsorgemaßnahmen, insbesondere zur Vorsorge gegen zu befürchtende Schäden, z. B. durch
  - weitere Luftreinhaltemaßnahmen zur Entlastung der Erdatmosphäre, insbesondere das Verbot von halogenierten Treibgasen und die Reduzierung von freigesetzten Treibstoffen und Lösungsmitteldämpfen,
  - Energieeinsparung und Änderung der Ressourcenverwendung,
  - Förderung weiterer Forschungs- und Entwicklungsvorhaben,
  - Entwicklungshilfeprojekte,
  - internationale Zusammenarbeit und Entwicklung neuer völkerrechtlicher Instrumentarien.

Einen ersten Zwischenbericht sollte die Kommission 1988 vorlegen.

Am 14. September 1987 beantragte die Fraktion DIE GRÜNEN die Einsetzung einer Enquete-Kommission „Langfristiger Klimaschutz“ (3).

Im Einsetzungsbeschuß sollte die Feststellung getroffen werden, daß der Deutsche Bundestag umgehend die Beratung von Maßnahmen gegen die vom Menschen verursachten Veränderungen in der Erdatmosphäre beginnen sollte. Zusätzlich sollte jedoch eine Enquete-Kommission eingesetzt werden, um langfristig relevante Handlungsmaßnahmen zum Kli-

maschutz, die über wissenschaftlich gesicherte Kenntnisse oder über unmittelbar plausible, sofort einzuleitende Maßnahmen hinausgehen, zu beraten.

Zur Begründung wurde ausgeführt, daß sich zwischen dem Beginn von Gegenmaßnahmen und der Verringerung der Atmosphärenbelastung die Klima-Vorsorgepolitik am vorhandenen Wissen und Erkenntnisstand orientiere, auf deren Grundlage jetzt gehandelt werden müsse.

Die Enquete-Kommission sollte zusätzlich zum bereits gegebenen politischen Handlungsbedarf die Aufgabe haben, auf der Grundlage einer Bestandsaufnahme über

- die globalen Veränderungen der Erdatmosphäre und den Stand der Ursachen- und Wirkungsforschung,
- getroffene, geplante und geforderte internationale Vorsorge- und Gegenmaßnahmen zum Schutz von Mensch und Umwelt,
- die erwarteten Wirkungen der unmittelbar eingeleiteten, dringlichsten und unstrittigsten nationalen Maßnahmen

weitergehende Vorschläge zur Klimaforschung und zur Forschungspolitik auf diesem Gebiet, zu weiteren Vorsorge- und Gegenmaßnahmen, sowie zur internationalen Kooperation auszuarbeiten.

Beispiele für solche weitergehenden und teilweise nur in internationaler Kooperation zu bearbeitenden Fragestellungen seien

- von Menschen hervorgerufene Klimaschwankungen von natürlichen Klimaschwankungen besser unterscheidbar zu machen,
- die Rolle von Distickstoffoxid (Lachgas) und weiteren halogenierten Kohlenwasserstoffen (z. B. bromierte Kohlenwasserstoffe),
- der Beitrag von Methan zum Treibhauseffekt, Emissionsquellen und internationale Maßnahmen zur Emissionsbegrenzung,
- Zersetzungsprodukte von Halogenkohlenwasserstoffen und ihre Auswirkungen auf Mensch und Umwelt,
- der Einstieg in die Wasserstoffenergiewirtschaft als Beitrag gegen den Treibhauseffekt,
- eine internationale Zusammenarbeit zur Erhaltung der Tropenwälder, z. B. Erarbeitung eines Verhaltenskodex zur Regulierung des Tropenholzeinschlags durch Konzessionierung, Kennzeichnung oder Importbeschränkungen,
- Schuldenerlaß für die Länder der Dritten Welt und andere Maßnahmen als notwendige Voraussetzung zum Umstieg in eine ökologisch verträgliche Wirtschaftsweise.

Auch in diesem Einsetzungsvorschlag wurde beantragt, daß die Kommission 1988 einen Zwischenbericht vorlegen sollte. Bis zum Jahr 1989 sollte ein Bericht vorgelegt werden, der konkrete Handlungsprioritäten und einen umsetzungsreifen Katalog der im

weiteren zu ergreifenden Maßnahmen enthalten sollte.

Parallel dazu wurden am 7. August 1987 zur Thematik des Schutzes der Ozonschicht durch Verbot des Einsatzes von Fluorchlorkohlenwasserstoffen (FCKW) ein Antrag der Fraktion der SPD (4) und am 14. September 1987 ein Antrag der Fraktion DIE GRÜNEN über ein Klimaschutzprogramm, namentlich Sofortmaßnahmen gegen den Abbau der Ozonschicht und die Auswirkungen des Treibhauseffektes (5) beim Deutschen Bundestag eingebracht.

Der Deutsche Bundestag hat alle diese Anträge in seiner 27. Sitzung am 17. September 1987 beraten und an den Ausschuß für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit federführend, sowie an den Ausschuß für Wirtschaft, den Ausschuß für Jugend, Frauen und Gesundheit, den Ausschuß für Verkehr, den Ausschuß für Forschung und Technologie und den Ausschuß für wirtschaftliche Zusammenarbeit zur Mitberatung überwiesen. In seiner 34. Sitzung am 16. Oktober 1987 hat der Deutsche Bundestag dann die Einsetzung einer Enquete-Kommission „Vorsorge zum Schutz der Erdatmosphäre“ gemäß § 56 der Geschäftsordnung des Deutschen Bundestages beschlossen (6).

Grundlage dazu war die Beschlußempfehlung des Ausschusses für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit vom 14. Oktober 1987 (7). Dieser hatte die beiden Einsetzungsanträge in seiner Sitzung am 7. Oktober 1987 wegen des Sachzusammenhanges in Verbindung mit den oben erwähnten Sachanträgen anberaten. Auf der Grundlage eines Kompromißvorschlages der Berichterstatter hat der Ausschuß dann in seiner Sitzung am 14. Oktober 1987 der dem Deutschen Bundestag vorgelegten Beschlußempfehlung einvernehmlich zugestimmt. Diese beruht auf dem Entwurf der Koalitionsfraktionen, ergänzt diesen jedoch um einige spezielle Themen, die sich teilweise bereits aus der Begründung dieses Antrags ergaben, teilweise aber auch auf Vorschlag der Berichterstatter der Fraktion der SPD und der Fraktion DIE GRÜNEN hinzugefügt worden sind. Außerdem wurde ergänzt, daß der für 1988 erbetene erste Zwischenbericht um Empfehlungen für vordringliche und bereits überschaubare Bereiche zu konkretisieren sei.

Im Deutschen Bundestag wurde der von allen Fraktionen gemeinsam getragene Auftrag und die Zusammensetzung der Kommission gemäß der Beschlußempfehlung des Ausschusses für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit wie folgt beschlossen:

„Zur parlamentarischen Diskussion möglicher Vorsorgemaßnahmen gegen die vom Menschen verursachten Veränderungen in der Erdatmosphäre und deren Auswirkungen auf Weltklima und Umwelt wird eine Enquete-Kommission „Vorsorge zum Schutz der Erdatmosphäre“ gemäß § 56 der Geschäftsordnung des Deutschen Bundestages eingesetzt.

#### I.

Die Kommission hat die Aufgabe, eine Bestandsaufnahme über die globalen Veränderungen der Erdatmosphäre vorzunehmen und den Stand der Ursachen- und Wirkungsforschung festzustellen sowie mögliche nationale und internationale Vorsorge- und Gegen-

maßnahmen zum Schutz von Mensch und Umwelt vorzuschlagen.

Insbesondere hat sie zu untersuchen

- Umfang und Ursachen des beobachteten und befürchteten Abbaus des Ozons in der Stratosphäre,
- Ausmaß und Ursachen möglicher globaler Temperaturveränderungen der Erdatmosphäre,
- Auswirkungen
  - des Ozonabbaus und des sog. Treibhauseffektes,
  - der Schadstoffemissionen, wie z. B. halogenierte Kohlenwasserstoffe, Distickstoffoxid, Methan und andere,
  - der Trübung der Erdatmosphäre und Auswirkungen auf das Klima durch Feinststäube,
  - der Abholzung von Regenwäldern und der Übernutzung der Vegetation in Trockengebieten auf atmosphärische Vorgänge,
  - der Kohlendioxid-Anreicherung der Erdatmosphäre,
  - der zunehmenden Meeresverschmutzung auf den CO<sub>2</sub>-Kreislauf,
- mögliche Vorsorgemaßnahmen, insbesondere zur Vorsorge gegen zu befürchtende Schäden, z. B. durch
  - weitere Luftreinhaltemaßnahmen zur Entlastung der Erdatmosphäre, insbesondere das Verbot von halogenierten Treibgasen und die Reduzierung von freigesetzten Treibstoff- und Lösungsmitteldämpfen,
  - Energieeinsparung und Änderung der Ressourcenverwendung, insbesondere Nutzung regenerativer Energiequellen,
  - Förderung weiterer Forschungs- und Entwicklungsvorhaben,
- Entwicklungshilfeprojekte, insbesondere Aufforstungsprojekte und Maßnahmen zum Schutz tropischer Regenwälder,
- internationale Zusammenarbeit und Entwicklung neuer völkerrechtlicher Instrumentarien.

## II.

Die Kommission setzt sich aus neun Abgeordneten der im Deutschen Bundestag vertretenen Fraktionen sowie aus neun Sachverständigen zusammen.

Einen ersten Zwischenbericht legt die Kommission 1988 vor mit Empfehlungen für vordringliche und bereits überschaubare Bereiche. Hierbei ist auch der Substitution von FCKW und konkreten Maßnahmen zur rationellen Energieverwendung besondere Aufmerksamkeit zu widmen.“

Im Hinblick darauf, daß seitens der Fraktionen ein so großes Interesse an einer Mitarbeit in der Kommission festzustellen war, daß die genannte Mitgliederzahl von neun Abgeordneten dafür nicht ausreichte, wurde am 26. November 1987 ein interfraktioneller Antrag der Fraktionen CDU/CSU, SPD, FDP und DIE GRÜNEN im Deutschen Bundestag eingebracht. Danach sollte die Zahl der Mitglieder des Deutschen Bundestages in der Kommission von neun auf elf erhöht werden (8).

Der Deutsche Bundestag hat diesem interfraktionellen Antrag in seiner 44. Sitzung am 27. November 1987 einvernehmlich zugestimmt.

Nach Vorlage des ersten Zwischenberichts der Enquete-Kommission haben es die Fraktionen übereinstimmend als notwendig angesehen, daß die Zahl der Sachverständigen in der Enquete-Kommission aufgrund der Intensität der Kommissionsarbeit von neun auf elf erhöht wird. Der Deutsche Bundestag hat einem entsprechenden interfraktionellen Antrag vom 24. November 1988 (9) in seiner 115. Sitzung am 7. Dezember 1988 einvernehmlich zugestimmt.



## 2. KAPITEL

## Zusammensetzung der Kommission

**1. Mitglieder der Kommission**

Von den Fraktionen sind folgende Mitglieder des Deutschen Bundestages für die Enquete-Kommission benannt:

*CDU/CSU-Fraktion:*

Bernd Schmidbauer, Vorsitzender

Hermann Fellner

Dr. Klaus W. Lippold (Offenbach), Obmann

Trudi Schmidt (Spiesen)

Heinrich Seesing

*SPD-Fraktion:*

Prof. Monika Ganseforth

Dr. Liesel Hartenstein, Stv. Vorsitzende

Dr. Klaus Kübler

Michael Müller (Düsseldorf), Obmann

*FDP-Fraktion:*

Dr. Inge Segall, Obfrau

## Fraktion DIE GRÜNEN:

Dr. Wilhelm Knabe, Obmann

Auf Vorschlag der Fraktionen berief der Präsident des Deutschen Bundestages als sachverständige Kommissionsmitglieder:

Prof. Dr. Wilfrid Bach, Forschungsstelle für angewandte Klimatologie und Umweltstudien, Institut für Geographie der Universität Münster

Prof. Dr. Dr. Paul Crutzen  
Max-Planck-Institut für Chemie, Mainz

Prof. Dr. Dr. Rudolf Dolzer  
Lehrstuhl für Deutsches und Ausländisches Öffentliches Recht, Völkerrecht und Europarecht der Universität Mannheim

Prof. Dr. Hartmut Graßl  
Fachbereich Geowissenschaften der Universität Hamburg, Direktor am Max-Planck-Institut für Meteorologie, Hamburg

Prof. Dr. Klaus Heinloth  
Physikalisches Institut der Universität Bonn

Prof. Dr. Peter Hennicke  
Institut für Angewandte Ökologie e.V. (Öko-Institut), Freiburg sowie Fachhochschule Darmstadt, Fachbereich Sozial- und Kulturwissenschaften

Prof. Dr. Klaus Michael Meyer-Abich, Senator a.D.  
Kulturwissenschaftliches Institut im Wissenschaftszentrum Nordrhein-Westfalen, Essen

Prof. Dr. Hans Michaelis, Generaldirektor  
Energiewirtschaftliches Institut an der Universität zu Köln

Prof. Dr. Wolfgang Schikarski  
Kernforschungszentrum Karlsruhe, Laboratorium für Aerosolphysik und Filtertechnik

Prof. Dr. Wolfgang Seiler  
Fraunhofer-Institut für atmosphärische Umweltforschung, Garmisch-Partenkirchen

Prof. Dr. Reinhard Zellner  
Institut für Physikalische Chemie der Universität Göttingen

**2. Kommissionssekretariat**

Die Verwaltung des Deutschen Bundestages stellte der Kommission ein Sekretariat zur Verfügung.

*Leitung des Sekretariats:*

Regierungsdirektor Bodo Bahr, Mag.rer.publ.

*Wissenschaftliche Aufgaben:*

Regierungsrat Hartmut Behrend, Diplom-Meteorologe

Studienassessor Heiko Braß  
Mag.rer.publ.

Dr. Wolfhart Dürrschmidt  
Diplom-Physiker

Martina Etzbach  
Sozialwissenschaftlerin

Dr. Anneke Trux  
Diplom-Biologin

Rainer Walz  
Diplom-Volkswirt

Renate Zimmermann  
Diplom-Meteorologin

*Organisatorische Aufgaben:*

Oberamtsrat Dieter Wehrend

*Sekretariatsaufgaben:*

Birgit Schulte  
Anette Coppee  
Christine Dörffler

Das Sekretariat wurde in seiner Arbeit ferner durch vorübergehend zugewiesene Verwaltungsangestellte, Aushilfsangestellte, Praktikanten und einen Wissenschaftsredakteur unterstützt.

Illustrationen, Graphiken und Reproduktion wurden erstellt von Maryse Forget (Diplom-Graphikerin) und Robert Fontner, Atelier für didaktische Graphik, 6127 Breuberg/Hainstadt.

### 3. KAPITEL

#### Bisherige Arbeit der Kommission

Die Kommission wurde am 3. Dezember 1987 vom Bundestagspräsidenten konstituiert.

Zum Vorsitzenden wurde der Abgeordnete Bernd Schmidbauer (CDU/CSU) bestimmt. Stellvertretende Vorsitzende ist die Abgeordnete Dr. Liesel Hartenstein (SPD).

Als Obleute, das heißt Sprecher ihrer Fraktion in der Kommission, wurden die Abgeordneten Dr. Klaus Lippold (CDU/CSU), Michael Müller (SPD), Dr. Inge Segall (FDP) und Dr. Wilhelm Knabe (DIE GRÜNEN) benannt.

Aus Anlaß der konstituierenden Sitzung hat der Vorsitzende unter anderem hervorgehoben, daß die Kommission dem Deutschen Bundestag nicht nur Empfehlungen im Rahmen des von ihr abzugebenden Zwischen- oder Abschlußberichtes vorlegen sondern auch angestrebt werden sollte, daß bei eindeutigen Zwischenergebnissen und Forderungen der Kommission, die sich aus der laufenden Arbeit ergäben, die in der Kommission vertretenen Mitglieder des Bundestages, die in den parlamentarischen Beratungsprozeß fest eingebunden seien, über ihre Fraktionen initiativ würden. Über entsprechende Initiativen solle versucht werden, Ergebnisse der Kommissionsarbeit laufend umzusetzen. Gerade dies sei die eigentliche Aufgabe und Chance einer Enquete-Kommission, daß sie nicht nur der Politik wissenschaftliche Erkenntnisse vermittele und Empfehlungen erarbeite, die am Ende einer Wahlperiode vorgelegt und dann nicht mehr oder nicht frühzeitig genug in parlamentarischen Beschlüssen umgesetzt würden, sondern daß sie die enge Verzahnung zwischen Politik und Wissenschaft in einem solchen Gremium dazu nutze, fundierte wissenschaftliche Erkenntnisse laufend in konkrete parlamentarische oder – über das Parlament durch politische Empfehlungen – in exekutive Maßnahmen umzusetzen. Dabei bestehe auch die Chance, daß abseits vom tagespolitischen Streit um Einzelfragen ein Problem in seiner komplexen Gesamtheit untersucht und als notwendig angesehene Maßnahmen in eine Gesamtkonzeption eingebunden werden könnten.

Diesen Ausführungen war von allen Kommissionsmitgliedern ausdrücklich zugestimmt worden.

Die Kommission hat im Rahmen ihrer bisherigen Tätigkeit mit Nachdruck versucht, dieser Zielvorgabe Rechnung zu tragen.

Dies konnte in einer Reihe von Fällen dadurch erreicht werden, daß der Deutsche Bundestag zu Gesetzes- und EG-Vorlagen sowie von den Fraktionen eingebrachten Anträgen Entschließungen verabschiedet hat, in die der jeweilige Stand der Beratungsergebnisse in der Kommission eingeflossen ist. Diese Entschließungen waren im Rahmen des Beratungsverfahrens auf Initiative der Kommissionsmitglieder eingebracht worden.

Im Rahmen einer Reihe von Plenardebatten, die die von der Enquete-Kommission bearbeiteten Themenbereiche unmittelbar oder mittelbar berührten, wurden in den Redebeiträgen der Sprecher aller Fraktionen die jeweils aktuellen Erkenntnisse der Kommissionsarbeit eingebracht. Diese bestimmten sowohl das Meinungsbild im Rahmen der Plenar- als auch im Rahmen der Ausschußberatungen.

Vom 3. Dezember 1987 bis zum 20. September 1990 hat die Kommission insgesamt 117 Sitzungen durchgeführt. Darüber hinaus fanden Sitzungen der Arbeitsgruppen „Ozonabbau in der Stratosphäre“, „Klimaveränderungen“, „Energiefragen“ und „Schutz der tropischen Wälder“ statt.

Die Kommission hat in ihrer 27. Sitzung am 2. November 1988 einen ersten Bericht zur Gesamthematik vorgelegt, in dem sie nicht nur eine detaillierte Bestandsaufnahme zum Ozonabbau in der Stratosphäre und zum Treibhauseffekt vorgenommen, sondern vor allem weitreichende Maßnahmen zum Schutz der Erdatmosphäre, insbesondere sehr konkrete Maßnahmenvorschläge zur Reduktion der Fluorchlorkohlenwasserstoffe (FCKW), aber auch grundlegende Strategien zur Eindämmung des zusätzlichen Treibhauseffektes, empfohlen hat. Darüber hinaus behandelt der Bericht in ersten Grundzügen auch die Problematik des Schutzes der tropischen Wälder.

Die Arbeit der Kommission bis zum November 1988 im einzelnen ist in ihrem ersten Bericht dargestellt (10). Dieser Bericht ist zwischenzeitlich sowohl auf nationaler als auch auf internationaler Ebene auf großes Interesse und äußerst positive Resonanz gestoßen. Eine Vielzahl politischer Gremien hat sich intensiv mit dem Bericht auseinandergesetzt und sich den darin enthaltenen Darstellungen und Vorschlägen angeschlossen.

So haben auf nationaler Ebene beispielsweise die Konferenz der Umweltminister des Bundes und der

Länder im November 1988 sowie eine Reihe von Landesparlamenten und Landesregierungen die Vorschläge der Kommission zur Reduzierung der FCKW einstimmig angenommen. Der Deutsche Bundestag hat den ersten Bericht der Kommission bereits am 7. Dezember 1988 in erster Lesung beraten und in seiner 131. Sitzung am 9. März 1989 in einer Entschließung einvernehmlich sowohl den im Bericht enthaltenen Analysen zum gegenwärtigen Sachstand in bezug auf den Ozonabbau in der Stratosphäre und den Treibhauseffekt sowie den daraus zu ziehenden Schlußfolgerungen als auch den Maßnahmevorschlägen inhaltlich voll zugestimmt (11). Die Bundesregierung hat die Umsetzung der Vorgaben des Bundestagsbeschlusses vom 9. März 1989 auf nationaler Ebene in die Wege geleitet. Das Bundeskabinett hat am 30. Mai 1990 eine Verordnung zum Verbot von bestimmten, die Ozonschicht abbauenden Halogenkohlenwasserstoffen entsprechend den Vorschlägen der Enquete-Kommission beschlossen (12).

Auf internationaler Ebene war und ist der Bericht Gegenstand zentraler UN- und Wissenschaftskonferenzen. Der Bericht wurde zudem von allen Auslandsvertretungen der Bundesrepublik Deutschland den zuständigen Ministerien in den jeweiligen Ländern zugeleitet. Aus fast allen Ländern sind mittlerweile Sachstandsberichte und Stellungnahmen eingetroffen, die bis auf die Ebene der Staats- und Regierungschefs dem Deutschen Bundestag für diese Arbeit höchste Anerkennung aussprechen.

Die von der Enquete-Kommission geforderte Verschärfung des Montrealer Protokolls ist in wesentlichen Punkten am 29. Juni 1990 im Rahmen einer internationalen Regierungskonferenz in London beschlossen worden (13). Auf europäischer Ebene hat die EG-Kommission in Brüssel einen Verordnungsentwurf vorgelegt, der auf der Grundlage des Berichtes aufbaut und die Empfehlungen der Enquete-Kommission aufgreift (14).

Aufgrund der positiven Resonanz des Berichtes und seiner Bedeutung im Rahmen der nationalen und internationalen Diskussion sind die Mitglieder der Enquete-Kommission gebeten worden, im Rahmen einer Vielzahl von nationalen und internationalen Kongressen und Fachveranstaltungen die Erkenntnisse und Empfehlungen der Kommission darzustellen. Einige Mitglieder der Kommission wurden außerdem in nationale und internationale Gremien berufen, die sich mit der Problematik des Schutzes der Erdatmosphäre befassen und sind darüber hinaus als Berater der Bundesregierung im Rahmen der internationalen Beratungen des Intergouvernementalen Ausschusses über Klimaänderungen (IPCC) tätig.

Die Mitglieder der Kommission haben außerdem zur Thematik des Schutzes der Erdatmosphäre zwischenzeitlich in zahlreichen Publikationen Stellung genommen und sich intensiv in den Medien an der öffentlichen Diskussion zu dieser Problematik beteiligt.

Im Rahmen der weiteren Kommissionsarbeit nach Vorlage des ersten Berichtes hat die Kommission – neben einer Aktualisierung des Wissensstandes zur Thematik des Ozonabbaus in der Stratosphäre und zu den weltweiten Klimaänderungen – parallel die The-

menbereiche „Reduktion der energiebedingten klimarelevanten Spurengasemissionen“ und „Schutz der tropischen Wälder“ intensiv vertieft und aufgearbeitet.

Dabei ist die Kommission übereingekommen, die Thematik des Schutzes der tropischen Wälder wegen ihrer Komplexität in einem gesonderten Bericht umfassend darzustellen. Dieser zweite Bericht wurde von der Kommission in ihrer 97. Sitzung am 17. Mai 1990 verabschiedet (15). Der Bericht enthält eine eingehende Bestandsaufnahme über Ausmaß und Entwicklung der Vernichtung tropischer Wälder, über die Ursachen dieser Vernichtung und die daraus resultierenden Auswirkungen. Darüber hinaus werden Handlungsmöglichkeiten zum Schutz der tropischen Wälder aufgezeigt. Auf dieser Grundlage wird eine weitreichende, in sich geschlossene Maßnahmenkonzeption mit einer Vielzahl von aufeinander abgestimmten und zeitlich konkretisierten politischen Strategien auf nationaler, europäischer und internationaler Ebene empfohlen. Außerdem enthält der Bericht einen Abschnitt über die Wälder außerhalb der Tropen.

Ziel dieses Berichtes ist es, einen möglichst weitreichenden und möglichst schnell wirkenden Schutz der tropischen Wälder und der in ihnen lebenden einheimischen Bevölkerung herbeizuführen. Außerdem geht es um Wege und um Strategien zu einer neuen und weitreichenden Kooperation zwischen den Industrieländern und den Staaten der Dritten Welt.

Dieser Bericht wurde bereits in der 218. Sitzung des Deutschen Bundestages am 22. Juni 1990 in erster Lesung beraten. Der Ausschuß für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit hat in seiner Sitzung am 19. September 1990 mehrheitlich beschlossen, dem Deutschen Bundestag die Annahme einer umfangreichen Entschließung zu empfehlen. Darin wird begrüßt, daß die Enquete-Kommission in diesem Bericht neben einer umfassenden Bestandsaufnahme der gegenwärtigen Sachlage sowie möglichen Entwicklungen und Auswirkungen der Vernichtung der tropischen Wälder weitreichende nationale, EG-weite und internationale Schutzmaßnahmen erarbeitet hat. Hervorgehoben wird, daß damit fundierte Empfehlungen vorliegen, auf deren Grundlage schnell und gezielt die entsprechenden Maßnahmen zu ergreifen sind. Begrüßt wird ferner, daß der Bericht von zahlreichen Stimmen aus Wissenschaft, Politik und dem Bereich der Medien, aber auch von ersten Stimmen aus dem internationalen Bereich als das im internationalen Vergleich umfassendste politische Dokument in der aktuellen Diskussion um Maßnahmen zum Schutz der tropischen Wälder eingestuft wird. Des Weiteren wird die grundlegende Aussage der Enquete-Kommission geteilt, daß die Vernichtung der tropischen Wälder und die daraus resultierenden klimatischen, ökologischen, ökonomischen und sozialen Folgen zu einer immer größeren Herausforderung für die Menschheit werden, wenn der gegenwärtigen Entwicklung nicht frühzeitig und umfassend Einhalt geboten wird. Außerdem wird sowohl den im Bericht enthaltenen Analysen zum gegenwärtigen Sachstand in bezug auf die Vernichtung der tropischen Wälder sowie den daraus zu ziehenden Schlußfolgerungen als auch den im Be-

richt enthaltenen Maßnahmenvorschlägen inhaltlich voll zugestimmt. Im Anschluß daran werden die Maßnahmenvorschläge des Berichts im einzelnen aufgelistet und zur Annahme empfohlen.

Es steht zu erwarten, daß der Deutsche Bundestag diese Entschließung noch im Oktober 1990 verabschiedet.

Die Arbeit der Kommission bis zum Mai 1990 im einzelnen ist in diesem Zweiten Bericht dargestellt (16).

Im Januar 1989 hat die Kommission im Rahmen eines mehrstündigen Gespräches die Gesamthematik des Schutzes der Erdatmosphäre intensiv mit dem Bundeskanzler erörtert. Der Kommissionsvorsitzende hat den Bundeskanzler zu diesem Themenbereich über die Zwischenergebnisse in der Arbeit der Kommission — insbesondere auch vor den Wirtschaftsgipfeln 1988 in Toronto, 1989 in Paris und 1990 in Houston — jeweils aktuell unterrichtet.

Der Bundeskanzler hat im Rahmen seiner Erklärung zum Abschluß des Wirtschaftsgipfels in Paris hervorgehoben, daß bei den Verhandlungen in der Vorbereitungszeit des Wirtschaftsgipfels spürbar gewesen sei, daß die Enquete-Kommission des Deutschen Bundestages zum Schutz der Erdatmosphäre in den davorliegenden Monaten zur internationalen Umweltdiskussion einen stark beachteten Beitrag geleistet habe (17) und zu Beginn des Jahres 1990 unterstrichen, daß die Enquete-Kommission einen ganz wichtigen Beitrag zur internationalen Debatte über die Erhaltung der tropischen Wälder geleistet habe.

Die Kommission hat die Thematik des Schutzes der Erdatmosphäre darüber hinaus in vier Sitzungen mit dem Bundesminister für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit, in jeweils zwei Sitzungen mit dem Bundesminister für Forschung und Technologie und dem Bundesminister für wirtschaftliche Zusammenarbeit, ferner mit dem Bundesminister für Ernährung, Landwirtschaft und Forsten sowie dem Bundesminister für Wirtschaft jeweils intensiv erörtert.

Der Vorsitzende der Enquete-Kommission hatte ferner den Bundesminister für Bildung und Wissenschaft gerade auch vor dem Hintergrund des großen Interesses aus dem Bildungsbereich an der von der Kommission erarbeiteten Thematik und ihren Berichten im Herbst 1989 gebeten, Vorschläge zur Umsetzung der Empfehlungen der Enquete-Kommission in geeignete Bildungsmaßnahmen zu entwickeln. Der Bundesminister für Bildung und Wissenschaft hatte daraufhin im Januar 1990 eine 30 Mitglieder umfassende Expertenkommission eingesetzt, die die Aufgabe hatte, für die wissens- und handlungsorientierten Aussagen in den Berichten der Enquete-Kommission Umsetzungsstrategien in das Bildungssystem zu entwickeln und — soweit möglich und sinnvoll — konkrete Empfehlungen dafür auszuarbeiten. Im Sommer 1990 hat diese Kommission einen Ergebnisbericht mit Vorschlägen zur Umsetzung der Empfehlungen der Enquete-Kommission in geeignete Bildungsmaßnahmen in bezug auf die allgemeinbildenden Schulen, die berufliche Bildung, die Berufsschulen, den Hochschulbereich und die Weiterbildung vorgelegt. Der Bun-

desminister für Bildung und Wissenschaft hat auf der Basis dieses Berichtes unter anderem gefordert,

- in bezug auf die allgemeinbildenden Schulen
  - ★ Konzepte vorzulegen, um den fächerübergreifenden Unterricht und die ökologisch begründete Lehreraus- und -fortbildung auch wirklich für die Praxis umzusetzen;
  - ★ die Lehrpläne zu ergänzen und gegebenenfalls neu zu interpretieren, das heißt vor allem, auch geeignete Unterrichtsmaterialien für alle Schulstufen zu entwickeln;
  - ★ konkrete Ergebnisse der Umweltforschung auch tatsächlich in die Lehrerfortbildung aufzunehmen;
- in bezug auf die berufliche Bildung
  - ★ die Ausbildungsordnungen und Rahmenpläne umgehend weiter zu ergänzen;
  - ★ die Vermittler umweltrelevanter Qualifikationen, also die Ausbilderinnen und Ausbilder, Berufsschullehrerinnen und -lehrer intensiver zu unterstützen;
  - ★ ein Modellversuchsprogramm „Umweltschutz in der beruflichen Bildung“ zu beginnen, um die Ergebnisse der Enquete-Kommission umzusetzen;
- in bezug auf die Hochschulen mehr fachübergreifende, problemorientierte Forschungsstrukturen zu erarbeiten, beispielsweise interdisziplinäre Studiengänge, deren Lerninhalte sich auch in den Prüfungsordnungen niederschlagen müßten, und
- in bezug auf die Weiterbildung eine Wissensvermittlung, die sich auf alle Lebensbereiche beziehe, zu entwickeln.

Er appellierte an die Verantwortlichen in Bund, Ländern und Gemeinden, an die Wirtschaftsverbände, Gewerkschaften, freien Träger und die Lehrenden, die Empfehlungen der Enquete-Kommission „Vorsorge zum Schutz der Erdatmosphäre“ zu berücksichtigen und kündigte an, daß er die zuständigen Gremien im Bildungsbereich zum Handeln auffordern werde.

Auch im Rahmen von Gesprächen mit dem Vorsitzenden der SPD-Bundestagsfraktion sowie den Fraktionsvorständen der Bundestagsfraktionen der FDP und DIE GRÜNEN wurde die Gesamthematik des Schutzes der Erdatmosphäre diskutiert.

Während des gesamten Verlaufs der Kommissionsarbeit haben alle von der Thematik berührten Ressorts sowie das Umweltbundesamt die Beratungen der Kommission intensiv begleitet und für eine reibungslose Zusammenarbeit und ständige Kommunikation zwischen der Kommission und den für diesen Bereich zuständigen Bundesministerien Sorge getragen.

Im Rahmen der laufenden Wahlperiode hat die Kommission insgesamt 15 — davon sieben zweitägige — Anhörungen durchgeführt, zu denen eine Vielzahl namhafter nationaler und internationaler Wissenschaftler, Vertreter nationaler Regierungen und inter-

nationaler Regierungsorganisationen, Vertreter der Industrie und Vertreter von Umweltverbänden geladen waren.

Die Ergebnisse dieser Anhörungen haben eine Fülle von Informationen erbracht, die in die Darstellungen der Kommissionsberichte eingeflossen sind.

Im Verlauf ihrer Tätigkeit hat die Kommission Sitzungen außerhalb Bonn in Frankfurt in Verbindung mit dem 6. Dechema-Fachgespräch über anthropogene Beeinflussung der Ozonschicht sowie mit dem Vorstand der Deutschen Bundesbahn, in Bremerhaven am Alfred-Wegener-Institut für Polar- und Meeresforschung sowie auf dem deutschen Forschungsschiff „Polarstern“, in Garmisch-Partenkirchen im Fraunhofer-Institut für Atmosphärische Umweltforschung, in Hamburg anlässlich des Weltkongresses über Klima und Entwicklung, in München-Neuherberg bei der Gesellschaft für Strahlen- und Umweltforschung anlässlich eines deutsch-französischen Colloquiums über den Treibhauseffekt, in Loccum im Zusammenhang mit einem internationalen Workshop über Climatic Change Problems and Options for Practical Response sowie im Kernforschungszentrum in Karlsruhe durchgeführt.

Die Kommission hat darüber hinaus im Rahmen ihrer Sitzungen intensive Gespräche zur Gesamthematik mit dem kanadischen Umweltminister Bouchard, mit einer US-Delegation des Committee on Acid Rain, mit dem Präsidenten der Umweltbehörde der USA Reilly, mit dem Energiewissenschaftler Dr. Lovins, mit der von der Ernährungs- und Landwirtschaftsorganisation der Vereinten Nationen eingesetzten unabhängigen Kommission zur Überprüfung des Tropen-Forstwirtschafts-Aktionsplanes unter der Leitung des ehemaligen schwedischen Ministerpräsidenten Ullsten sowie mit Energiesachverständigen aus Dänemark und Schweden erörtert.

Der Kommissionsvorsitzende hat die mit dem Schutz der Erdatmosphäre verbundenen Fragestellungen darüber hinaus mit amerikanischen Regierungsvertretern, dem französischen Umweltminister, dem gegenwärtigen Präsidenten des EG- Umweltministerrates, Vertretern des Heiligen Stuhls und bereits zweimal mit dem Generaldirektor der Ernährungs- und Landwirtschaftsorganisation der Vereinten Nationen sowie dem Exekutivdirektor des Wissenschafts- und Technologiezentrums der Vereinten Nationen (FAO) diskutiert.

Delegationen der Kommission haben Informationsreisen nach Südamerika, Afrika und Südostasien – schwerpunktmäßig bezogen auf die Tropenwaldproblematik, aber auch – zur Gesamtproblematik des Schutzes der Erdatmosphäre durchgeführt. Im Rahmen äußerst dicht gedrängter Programmabläufe wurden jeweils eine Fülle von Gesprächen geführt. Die Ergebnisse dieser Reisen sind bereits in die bisher vorgelegten Berichte eingeflossen.

Die Enquete-Kommission hat ferner die Gesamthematik des Schutzes der Erdatmosphäre am 20. und 21. März mit vier Kommissaren und Vertretern von insgesamt sechs Generaldirektionen der Kommission der Europäischen Gemeinschaften in Brüssel beraten. Der Kommissionsvorsitzende wurde zwischenzeitlich in

den Beratungsausschuß der EG-Kommission zu Fragen der Eindämmung des zusätzlichen Treibhauseffektes berufen.

Die Kommissionsmitglieder Prof. Dr. Dr. Dolzer, Prof. Dr. Graßl und Prof. Dr. Heinloth beraten die Bundesregierung im Rahmen des Intergouvernementalen Ausschusses über Klimaänderungen (IPCC) und nehmen mit Vertretern der Bundesregierung an den Sitzungen der IPCC-Arbeitsgruppen teil. Dadurch konnte gewährleistet werden, daß die Arbeitsergebnisse der Kommission nicht nur über die Vertreter der Bundesregierung, sondern auch direkt über Kommissionsmitglieder in die gegenwärtige internationale Diskussion eingeflossen sind. Gleichzeitig konnte die Kommission auf die jeweils aktuellen Ergebnisse der IPCC-Arbeitsgruppen zurückgreifen, so daß die Ergebnisse der IPCC-Berichte, die für die Weltklimakonferenz vom 29. Oktober bis zum 6. November 1990 in Genf vorgelegt worden sind, in den vorliegenden Bericht eingeflossen und von der Kommission im Rahmen ihrer Überlegungen voll berücksichtigt worden sind.

Intensive Gespräche wurden außerdem mit dem Wissenschafts- und Technologiezentrum der Vereinten Nationen, insbesondere auch zur Vorbereitung der im Mai 1990 in Saarbrücken stattgefundenen Konferenz über „Energy in Climate and Development: Policy Issues and Technological Options“, im Rahmen derer die seinerzeitigen Beratungsergebnisse der Enquete-Kommission zur Energieproblematik vorgestellt worden sind, geführt.

Mitglieder und Mitarbeiter der Kommission haben ferner im In- und Ausland an einer Vielzahl von Fachkongressen teilgenommen, die sich mit allen Bereichen der Gesamthematik befaßt haben und haben der Kommission jeweils über deren Ergebnisse berichtet, so daß diese laufend über den Stand der aktuellen fachlichen Diskussion unterrichtet war und die Ergebnisse dieser Kongresse in ihre Arbeiten und Beratungen einbeziehen konnte.

Darüber hinaus wurden der Kommission eine Fülle von weiteren Stellungnahmen und Materialien, die teilweise auch noch nicht veröffentlicht worden sind, zur Verfügung gestellt. Diese Materialien sind ebenfalls mit in die Ausarbeitung des Berichtes eingeflossen.

Die Arbeit an dem vorliegenden Bericht stand unter der besonderen Schwierigkeit, daß die Aufarbeitung der Energieproblematik, insbesondere die Durchführung, Abwicklung und Beratung des im Abschnitt D, 6. Kapitel im einzelnen dargestellten Studienprogramms der Kommission über Energie und Klima parallel zur Vorbereitung und Beratung des Tropenwaldberichtes durchgeführt werden mußte. Dies hatte zur Folge, daß für die eigentliche Erstellung und Beratung dieses dritten Berichtes in Anbetracht des bevorstehenden Endes der laufenden Wahlperiode nur vier Monate zur Verfügung standen.

Im Rahmen des Beratungsprozesses hat die Kommission eine Reihe von Experten zu Einzelsektoren der Bereiche des Treibhauseffektes und des Ozonabbaus

in der Stratosphäre um Stellungnahmen gebeten und Gesprächsrunden zu Textteilen mit Sachverständigen durchgeführt. Zu diesen Experten gehörten:

Dr. Christoph Brühl,  
Max-Planck-Institut für Chemie, Mainz

Dr. Ulrich Cubasch,  
Max-Planck-Institut für Meteorologie, Hamburg

Dr. Jae Edmonds,  
Pacific Northwest Laboratory, Washington D.C.,  
USA

Dr. J. Hahn,  
Fraunhofer-Institut für Atmosphärische Umweltfor-  
schung, Garmisch-Partenkirchen

Prof. Dr. Klaus Hasselmann,  
Max-Planck-Institut für Meteorologie, Hamburg

Dr. Martin Heimann,  
Max-Planck-Institut für Meteorologie, Hamburg

Dr. Atul Jain,  
Geographisches Institut der Universität Münster

Prof. Dr. Hans Jürgen Liebscher,  
Bundesanstalt für Gewässerkunde, Koblenz

Dr. Irving Mintzer,  
Center for Global Change, Collagepark, Maryland,  
USA

Dr. Erich Roeckner,  
Meteorologisches Institut der Universität Hamburg

Dr. Robert Sausen,  
Meteorologisches Institut der Universität Hamburg

Dr. Eberhard Schaller,  
Fraunhofer-Institut für Atmosphärische Umweltfor-  
schung, Garmisch-Partenkirchen

Dr. Dennis Tirpark,  
United States Environmental Protection Agency Wa-  
shington, D.C., USA

Im vorliegenden Bericht schlägt die Kommission eine Reihe von einvernehmlich getragenen Maßnahmenkonzepten und Einzelmaßnahmen vor, die die bisherigen Kommissionsvorschläge auf der Basis des gegenwärtigen Beratungsstandes weiterentwickeln. Diesbezüglich ist darauf hinzuweisen, daß der Ausschuß für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit am 19. September 1990 beschlossen hat, dem Deutschen Bundestag zu empfehlen, den in diesem Bericht enthaltenen Vorschlägen der Enquete-Kommission zur Reduktion der energiebedingten klimarelevanten Spurengase auf EG-Ebene zuzustimmen. Es steht daher zu erwarten, daß der Deutsche Bundestag noch vor den Beratungen des EG-Umweltministerrates Ende Oktober 1990 und noch vor der 2. Weltklimakonferenz Ende Oktober/Anfang November 1990 in Genf die Kommissionsempfehlungen zur Reduktion der energiebedingten klimarelevanten Spurengase auf EG-Ebene aus Anlaß der Beratung einer EG-Vorlage über die politischen Zielsetzungen der Gemeinschaft zum Treibhauseffekt (18) verabschiedet.

Vor dem Hintergrund der für diesen Bericht zur Verfügung stehenden Beratungszeit hat sich die Kommission entschlossen, im vorliegenden Bericht unabhängig von ihrem grundsätzlich konsensorientierten Arbeitsstil nicht nur die einvernehmlich getragenen Positionen darzustellen, sondern insbesondere im Energiebereich auch die auf der Basis des gegenwärtigen Diskussionsstandes nur von jeweils einigen Mitgliedern getragenen und teilweise noch sehr kontroversen Wertungen darzustellen und aufzuzeigen, wie sich einzelne oder mehrere Mitglieder eine weitere Konkretisierung der Maßnahmenkonzepte im einzelnen vorstellen. In diesem Bereich hat die Kommission – gerade in bezug auf die noch strittigen Fragen – eine intensive weitere Diskussion als notwendig erachtet, die nach Auffassung der Kommission in der kommenden Wahlperiode durch Fortführung der Kommissionsarbeit ermöglicht werden soll. Durch die Darstellung auch der noch nicht in der Kommission ausdiskutierten konkretisierenden Handlungsempfehlungen einzelner Kommissionsmitglieder oder Gruppen von Kommissionsmitgliedern soll die Möglichkeit eröffnet werden, die Diskussion über Maßnahmen in Politik und Öffentlichkeit auf der Basis der unterschiedlichen Konzeptionen der Kommissionsmitglieder weiterzuführen und zu weiteren Ergebnissen zu gelangen.

Weitere Arbeitsfelder innerhalb der Gesamthematik, deren grundlegende Aufarbeitung die Kommission in der kommenden Wahlperiode als notwendig erachtet, sind in Abschnitt A im einzelnen aufgelistet.

Die Kommission sieht die Fortsetzung ihrer Arbeit trotz ihres umfangreichen und intensiven Arbeitsprogramms in dieser Wahlperiode und der weltweiten Anerkennung, die die Arbeit der Kommission gefunden hat, auch nach Vorlage dieses Berichtes nicht als erledigt an. Dies gilt vor allem für die weitere Aufarbeitung der Energieproblematik mit ihren energiever-sorgungspolitischen, energieverbrauchspolitischen und verkehrspolitischen Implikationen. Die weitere Aufarbeitung dieser Thematik unter dem Leitgedanken, die Erdatmosphäre zu schützen, ist nach Auffassung der Kommission zwingend erforderlich. Hierbei sind auch die aktuelle Entwicklung nach der Herstellung der Einheit Deutschlands sowie die Umstrukturierungen in Osteuropa und der Sowjetunion zu berücksichtigen. Insbesondere müssen die sich im Hinblick auf den Beitritt der DDR für die nationale Strategie ergebenden Fragen im einzelnen aufgearbeitet werden. Bei den übrigen Sachbereichen ist eine kompetente Begleitung der weiteren wissenschaftlichen und politischen Entwicklung insbesondere der Arbeit zuständiger internationaler Organisationen – wie dem IPPC – angesichts immer wieder auftretender nationaler und internationaler Irritationen erforderlich.

Daher wird die Kommission ihre Arbeit – entsprechend den Empfehlungen in einem interfraktionellen Antrag – zunächst bis zum Ende der Wahlperiode fortsetzen und plädiert dafür, im Rahmen der kommenden Wahlperiode erneut eine entsprechende Enquete-Kommission einzusetzen.

## 4. Literaturverzeichnis

- (1) Vgl. Regierungserklärung des Bundeskanzlers vor dem Deutschen Bundestag, in: Presse- und Informationsamt der Bundesregierung (Hrsg.), Bulletin Nr. 27, Bonn, den 19.03.87, S. 213
- (2) Vgl. BT-Drucksache 11/533: Antrag der CDU/CSU-Fraktion und der Fraktion der FDP „Einsetzung einer Enquete-Kommission ‚Vorsorge zum Schutz der Erdatmosphäre‘“, Bonn, den 24.06.87
- (3) Vgl. BT-Drucksache 11/787: Antrag der Fraktion DIE GRÜNEN „Einsetzung einer Enquete-Kommission ‚Langfristiger Klimaschutz‘“, Bonn, den 14.09.87
- (4) Vgl. BT-Drucksache 11/678: Antrag der SPD-Fraktion „Schutz der Ozonschicht durch Verbot des Einsatzes von Fluorchlorkohlen-wasserstoffen (FCKW)“, Bonn, den 07.08.87
- (5) Vgl. BT-Drucksache 11/788: Antrag der Fraktion DIE GRÜNEN „Klimaschutzprogramm: Sofortmaßnahmen gegen den Abbau der Ozonschicht und die Auswirkungen des Treibhauseffektes“, Bonn, den 14.09.87
- (6) Vgl. Deutscher Bundestag: Stenographischer Bericht der 34. Sitzung (Plenarprotokoll 11/34), Bonn, den 16.10.87, 2296 D
- (7) Vgl. BT-Drucksache 11/971: Beschlußempfehlung und Bericht des Ausschusses für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit (21. Ausschuß) zum Antrag der CDU/CSU-Fraktion und der Fraktion der FDP „Einsetzung einer Enquete-Kommission ‚Vorsorge zum Schutz der Erdatmosphäre‘“ (BT-Drucksache 11/533) und zum Antrag der Fraktion DIE GRÜNEN „Einsetzung einer Enquete-Kommission ‚Langfristiger Klimaschutz‘“ (BT-Drucksache 11/787), Bonn, den 15.10.87
- (8) Vgl. BT-Drucksache 11/1351
- (9) Vgl. BT-Drucksache 11/3479
- (10) Vgl. EK-Vorsorge zum Schutz der Erdatmosphäre: Schutz der Erdatmosphäre – Eine internationale Herausforderung. Zwischenbericht der Enquete-Kommission des 11. Deutschen Bundestages „Vorsorge zum Schutz der Erdatmosphäre“, 3. Auflage, Bonn 1990; auch veröffentlicht in der Schriftenreihe des Deutschen Bundestages „Zur Sache“ 5/88, 1. und 2. Auflage sowie in BT-Drucksache 11/3246, S. 87 ff; englische Ausgabe unter dem Titel: Protecting the Earth's Atmosphere: An International Challenge; Interim Report of the Enquete-Commission „Preventive Measures to Protect the Earth's Atmosphere“ of the 11th German Bundestag, Bonn, German Bundestag, 1989
- (11) Vgl. Deutscher Bundestag: Stenographischer Bericht der 131. Sitzung (Plenarprotokoll 11/131), Bonn, den 09.03.89, 9586C-9607A und BT-Drucksache 11/4133: Erste Beschlußempfehlung und Bericht des Ausschusses für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit zu dem Ersten Zwischenbericht der Enquete-Kommission „Vorsorge zum Schutz der Erdatmosphäre“ gemäß Beschluß des Deutschen Bundestages vom 16. Oktober und 27. November 1987 – Drucksachen 11/533, 11/787, 11/971, 11/1351, 11/3246.
- (12) Vgl. EK-Vorsorge zum Schutz der Erdatmosphäre, Zwischenbericht, a.a.O., S. 625 ff.
- (13) Vgl. dazu Abschnitt D, 5. Kap., 1.1.3
- (14) Vgl. BR-Drucksache 247/90: Vorschlag einer Verordnung (EWG) des Rates über Stoffe, die zu einem Abbau der Ozonschicht führen, KOM (90) endg.; Ratsdok 4451/90, Bonn, den 4.4.90
- (15) Vgl. EK-Vorsorge zum Schutz der Erdatmosphäre: Schutz der Tropenwälder – Eine internationale Schwerpunktaufgabe, Zweiter Bericht der Enquete-Kommission des 11. Deutschen Bundestages „Vorsorge zum Schutz der Erdatmosphäre“, Bonn 1990; auch veröffentlicht in der Schriftenreihe des Deutschen Bundestages „Zur Sache“ 10/90 sowie in BT-Drucksache 11/72 20; englische Ausgabe unter dem Titel: Protecting the Tropical Forests: A High-Priority International Task; 2nd Report of the Enquete-Commission „Preventive Measures to Protect the Earth's Atmosphere“ of the 11th German Bundestag, Bonn, German Bundestag, 1990
- (16) Vgl. EK-Vorsorge zum Schutz der Erdatmosphäre, Zweiter Bericht, a.a.O., S. 61 ff.
- (17) Vgl. Erklärung des Bundeskanzlers zum Abschluß des Wirtschaftsgipfels, in: Presse- und Informationsamt der Bundesregierung (Hrsg.), Wirtschaftsgipfel Paris (Bulletin Nr. 76), Bonn, den 19. Juli 1989, S. 672
- (18) Mitteilung der Kommission an den Rat: Die politischen Zielsetzungen der Gemeinschaft zum Treibhauseffekt, SEK (90), 495 endg., Ratsdok.-Nr. 5557/90

## Abschnitt C

### Treibhauseffekt und Klimaänderung

#### Einführung

Der zusätzliche Treibhauseffekt stellt eine Gefahr kaum vorstellbaren Ausmaßes für die gesamte Menschheit dar. Im Unterschied zu den bisherigen Umweltgefahren handelt es sich um eine weltweite Bedrohung, deren lokale und regionale Auswirkungen derzeit kaum abgeschätzt werden können. Werden keine wirksamen Gegenmaßnahmen ergriffen, ist mit dramatischen Folgen zu rechnen, die alle Regionen der Erde betreffen werden.

Die Abwendung dieses globalen Gefährdungspotentials oder zumindest seine Eindämmung sind eine der großen Herausforderungen für die Menschheit. Die Emissionen von Treibhausgasen, vor allem Kohlendioxid, aber auch von Fluorchlorkohlenwasserstoffen, Methan, Distickstoffoxid und ozonbildenden Substanzen (vor allem Stickoxiden und Kohlenmonoxid) und die damit verbundene Zunahme ihrer Konzentrationen in der Atmosphäre erwärmen die Erdoberfläche und die untere Atmosphäre derzeit mit zunehmender Geschwindigkeit.

Auf diese Weise führt die Menschheit ein ungewolltes Experiment durch, dessen Ausgang bis heute ungewiß ist. Daher ist es aus Gründen der Vorsorge notwendig, so schnell wie möglich weitreichende Maßnahmen zum Schutz der Erdatmosphäre zu ergreifen und die weitere Verschmutzung der Atmosphäre zu verhindern. Dabei sind Politik, Wissenschaft, Wirtschaft und jeder einzelne zum Handeln aufgefordert. Aufgabe der Politik ist es, wissenschaftliche Erkenntnisse zum Schutz der Menschheit möglichst schnell umzusetzen sowie unter Vorsorgegesichtspunkten wirksame Strategien zu entwickeln und für deren Durchführung die notwendigen Voraussetzungen und Grundlagen zu schaffen. Dabei muß berücksichtigt werden, daß die Wissenschaft bei der Erforschung der Umweltprobleme mit der derzeitigen Geschwindigkeit der Umweltschädigung immer weniger Schritt halten kann. Dies liegt zum einen daran, daß bisher nicht erkannte und durch in den vergangenen Jahrzehnten emittierte Schadstoffe verursachte Umweltprobleme erst heute sichtbar werden, und zum anderen, daß in immer schnellerer Folge neue Schadstoffe in die Luft, in die Gewässer und in die Böden gelangen. Diese Entwicklung schädigt Ökosysteme in einem Ausmaß, das nicht immer rechtzeitig erkannt oder vorausberechnet werden kann. Dies ist der Grund dafür, daß eine vorsorgende Umweltpolitik nötig ist.

Die natürlicherweise in der Atmosphäre vorhandenen Treibhausgase erhöhen die mittlere Temperatur an der Erdoberfläche von  $-18^{\circ}\text{C}$  auf etwa  $15^{\circ}\text{C}$ . Dadurch wird das Leben in der jetzigen Form erst möglich. Der zusätzliche, vom Menschen durch eine verstärkte Emission klimarelevanter Spurengase verursachte

Treibhauseffekt wirkt bereits heute und wird nach dem aktuellen internationalen Sachstand der Klimatologie für die Zunahme der Temperatur um  $0,5^{\circ}\text{C}$  in den vergangenen 100 Jahren verantwortlich gemacht. Allerdings ist der wissenschaftliche Beweis, daß diese Erwärmung die Wirkung des zusätzlichen Treibhauseffekts ist, noch nicht völlig erbracht, da sich die Temperaturerhöhung und die daraus resultierenden Klimaänderungen noch im Rahmen statistischer Klimaschwankungen bewegen.

Trotzdem warnen die meisten Wissenschaftler und große Wissenschaftlervereinigungen vor einem weiteren Hinauszögern von Maßnahmen, bis der letzte statistische Beweis erbracht worden ist. Ganz im Gegenteil werden mit allem Nachdruck weitreichende und unmittelbar wirkende Konzepte zur Reduktion der Emissionen von Treibhausgasen gefordert. Dabei werden folgende Argumente angeführt:

1. Wegen seiner hohen Wärmekapazität verzögert der Ozean die Erwärmung der Erdoberfläche und der unteren Atmosphäre um 30 bis 40 Jahre. Dies bedeutet, daß die Temperatur auch dann noch weiter zunehmen würde, wenn die Emissionen der Treibhausgase sofort und in vollem Umfang eingestellt würden. Die volle Wirkung des zusätzlichen Treibhauseffektes wird dadurch erst zeitlich verzögert für die Menschheit erkennbar.
2. Die Lebensdauer vieler Treibhausgase in der Atmosphäre liegt im Bereich von 100 Jahren. Daher befindet sich die Konzentration eines Treibhausgases nicht im Gleichgewicht mit den Emissionsraten. Selbst wenn die Emissionsraten auf dem heutigen Stand „eingeforen“ werden könnten, würde die Konzentration in den folgenden 100 Jahren weiter ansteigen. Wegen dieser sich über Jahrzehnte erstreckenden Verzögerung des Konzentrationsanstiegs vieler Treibhausgase ist mit einer Verminderung der Emissionen möglichst umgehend zu beginnen.
3. Die durch den zusätzlichen Treibhauseffekt hervorgerufene Temperaturerhöhung kann, weil es eine Reihe von Wechselwirkungen zwischen den das Klima bestimmenden Parametern gibt, zu einer Zunahme der Konzentration von Treibhausgasen in der Atmosphäre führen und dadurch den Treibhauseffekt weiter verstärken. Die Rückkopplungen – so unter anderem das Auftauen der arktischen Böden und als Folge die Freisetzung von Methan oder ein zu befürchtendes klimabedingtes Waldsterben – werden erst mit einer erheblichen Zeitverzögerung wirksam.

Weiterhin wird von Wissenschaftlern immer wieder auf die Befürchtung hingewiesen, das die Auswirkungen des zusätzlichen Treibhauseffektes so weitrei-



chend sein könnten, daß die Verantwortung gegenüber den folgenden Generationen ein sofortiges Handeln gebietet.

Der zusätzliche Treibhauseffekt führt nach Aussagen der Klimatologen innerhalb des nächsten Jahrhunderts dazu, daß der Meeresspiegel um 30 bis 110 cm ansteigen wird und daß sich die Klimazonen verschieben werden. Als eine der Folgen wird sich die Ernährungssituation der Menschheit in großen Gebieten der Erde dramatisch verschlechtern und zu einer aus der Not geborenen Übernutzung und Zerstörung empfindlicher Ökosysteme führen. Damit verbundene Hungersnöte werden Verteilungskonflikte, große Wanderungsbewegungen beziehungsweise Umweltflüchtlingsströme auslösen. Dies alles muß vor dem Hintergrund betrachtet werden, daß bereits heute

weltweit 200 000 km<sup>2</sup> beziehungsweise ein Prozent der landwirtschaftlichen Nutzflächen pro Jahr durch Wüstenbildung, Erosion, Versalzung, Übernutzung der Böden und weiteren Faktoren vernichtet werden.

Diese Umweltprobleme, die der zusätzliche Treibhauseffekt verursacht, werden durch die Zerstörung der Ozonschicht in der Stratosphäre, die Schädigung der Wälder durch Luftschadstoffe und die weiter zunehmende Verschmutzung der Meere verstärkt. Angesichts dieser Situation erscheint es schon nicht mehr möglich, eine bedrohliche Entwicklung zu vermeiden. Es ist deshalb unbedingt erforderlich, ihr möglichst schnell und mit der gebotenen Intensität entgegenzuwirken und die Umweltschäden auf ein Minimum zu reduzieren.

## 1. Kapitel

### Darstellung des aktuellen Kenntnisstandes

#### 1. Allgemeine Angaben zur Erdatmosphäre

##### 1.1 Klima und Atmosphäre

Generell wird unter dem Klima einer Region der Mittelwert des Wettergeschehens verstanden. Dieser Mittelwert berücksichtigt neben der Luft- und Meerestemperatur auch den Niederschlag, die Bodenfeuchte, die Strahlung sowie die Häufigkeit und Stärke extremer Wettersituationen. Um statistisch gesicherte Aussagen über die Langzeitentwicklung oder den Trend des globalen Klimas zu ermöglichen, sind Mittelungen über Zeitperioden von mindestens 20 bis 30 Jahren notwendig. Dadurch unterscheidet sich das Klima deutlich vom normalen Wettergeschehen, dessen Zeitskalen im Bereich von Tagen oder wenigen Wochen – wie beispielsweise im Fall von Hoch- und Tiefdruckgebieten –, oder von Minuten bis zu mehreren Stunden – wie beispielsweise im Fall der Lebensdauer einer Wolke – liegen.

Das Klima der Erde wird durch eine Vielzahl komplexer und untereinander gekoppelter Regelkreise kontrolliert, an denen die Atmosphäre, die Biosphäre (die lebenden Organismen), der Ozean und die Kryosphäre (die Eisflächen) beteiligt sind. Die in den einzelnen Regelkreisen ablaufenden Prozesse sowie die für die Kopplung der Regelkreise verantwortlichen Mechanismen sind trotz ihrer großen Bedeutung weitgehend unbekannt. In diese Regelkreise greift der Mensch in zunehmendem Maße durch technologische und landwirtschaftliche Aktivitäten ein, durch die unter anderem die chemische Zusammensetzung der Erdatmosphäre und dadurch der Strahlungshaushalt der Erde, der das irdische Klima maßgeblich bestimmt, verändert wird.

Die wesentlichen Beiträge zum Strahlungshaushalt der Erde sind die Einstrahlung der solaren Energie und die von der Erdoberfläche wieder abgegebene

Strahlung. Die der Erde zugeführte Energie besteht im wesentlichen aus der kurzwelligen Sonnenstrahlung, die bei Auftreffen auf die Erdoberfläche in Wärme umgesetzt und von dort als langwellige Wärmestrahlung – Infrarotstrahlung – wieder in das Weltall zurückgestrahlt wird. Zwischen der einstrahlenden und der von der Erdoberfläche abgegebenen Strahlung stellt sich ein dynamisches Gleichgewicht ein, das die Temperatur auf der Erde bestimmt und das im wesentlichen durch den Abstand der Erde von der Sonne und die Temperatur der Sonnenoberfläche (etwa 6000°C) vorgegeben ist.

Würde die Erdatmosphäre keine klimarelevanten Spurenstoffe enthalten, würde sich die Temperatur an der Erdoberfläche auf einen Wert von  $-18^{\circ}\text{C}$  einpendeln. In diesem Fall wäre die Erde ein zu Eis erstarrter Planet, auf dem Leben in der jetzigen vielfältigen Form nicht möglich wäre. Tatsächlich liegt die über die gesamte bodennahe Schicht der Erde gemittelte Temperatur zur Zeit aber bei  $+15^{\circ}\text{C}$ . Die Temperaturdifferenz von  $33^{\circ}\text{C}$ , ist auf die Wirkung der Erdatmosphäre und hier insbesondere auf die in der Troposphäre angetroffenen klimarelevanten Spurengase zurückzuführen. Diese Wirkung wird auch als „natürlicher Treibhauseffekt“ bezeichnet. Dazu tragen bei:

- der Wasserdampf (H<sub>2</sub>O)
- das Kohlendioxid (CO<sub>2</sub>)
- das Ozon (O<sub>3</sub>)
- das Distickstoffoxid (N<sub>2</sub>O).

Klimawirksam sind außerdem die luftgetragenen Partikel (Aerosole) sowie die Wolkenteilchen. Neuerdings kommen noch weitere Spurengase wie beispielsweise die Fluor-Chlor-Kohlenwasserstoffe (FCKW) hinzu, die rein anthropogener Natur sind und zur Zerstörung der Ozonschicht (vgl. Abschnitt D) bei-

tragen sowie den Strahlungshaushalt der Erde und damit das Klima beeinflussen.

Diese Spurengase lassen die von der Sonne eingestrahelte Energie weitgehend ungehindert passieren, absorbieren aber die von der Erdoberfläche emittierte langwellige Wärmestrahlung stark. Die Folge ist eine Verringerung der Wärmeabstrahlung von der Erdoberfläche und der unteren Atmosphäre, die zu einer Zunahme der Temperatur in diesen Luftschichten führt. Dieser Erwärmung steht in der oberen Troposphäre und Stratosphäre eine verstärkte Wärmeabstrahlung und dementsprechend eine Abkühlung dieser Höhenschicht gegenüber. Wegen dieses Effekts ist die Wirkung der klimarelevanten Spurengase nicht nur von der Konzentration<sup>1)</sup>, sondern auch von ihrer Höhenverteilung abhängig. Zu dem natürlichen Treibhauseffekt von 33°C trägt

- |                        |            |
|------------------------|------------|
| – der Wasserdampf      | mit 20,6°C |
| – das Kohlendioxid     | mit 7,2°C  |
| – das Ozon             | mit 2,4°C  |
| – das Distickstoffoxid | mit 1,4°C  |
| – das Methan           | mit 0,8°C  |

bei. Der Rest verteilt sich auf eine Reihe anderer Spurengase.

Daß der natürliche Treibhauseffekt die Temperatur auf der Erdoberfläche um 33°C erhöht, beweist nicht nur die eminente Bedeutung der klimarelevanten Spurengase für das Leben auf der Erde. Sie macht auch deutlich, daß Änderungen der Konzentrationen der klimarelevanten Spurengase und ihrer vertikalen Verteilungen in der Erdatmosphäre zu Änderungen der Temperatur und damit des Klimas führen müssen.

## 1.2 Dynamik und Struktur der Atmosphäre

Die Erde ist, wie andere ähnlich große Planeten, von einer Atmosphäre umgeben, in der der Druck exponentiell mit der Höhe abnimmt. Der Luftdruck beträgt am Boden im Mittel 1013 Hektopascal, in einer Höhe von 5,5 km ist er bereits auf die Hälfte abgesunken. In den ersten 11 Höhenkilometern sind drei Viertel der Gesamtmasse der Erdatmosphäre konzentriert. Würden in der ganzen Atmosphäre die an der Erdoberfläche angetroffenen mittleren Druck- und Temperaturverhältnisse herrschen, dann wäre sie lediglich 8,3 km dick. Die Gesamtmasse der Erdatmosphäre ist mit 5,1 Milliarden Tonnen etwa tausendmal geringer als die Wassermasse der Ozeane und etwa einmillionmal geringer als die Masse der gesamten Erde.

Von besonderer Bedeutung für die horizontale und vertikale Durchmischung – und damit auch für die chemische Zusammensetzung der Erdatmosphäre – ist die Temperaturverteilung, die durch verschiedene miteinander gekoppelte physikalische und chemische

<sup>1)</sup> In diesem Bericht wird – wie in der Physik der Atmosphäre üblich – Konzentration durch das Volumenmischungsverhältnis beschrieben, das heißt, die Konzentration eines Stoffes in der Luft ist sein Anteil am Volumen der Luft. Gemessen wird die Volumenkonzentration in ppmv (parts pro million = Teile auf eine Million; bezogen auf das Volumen).

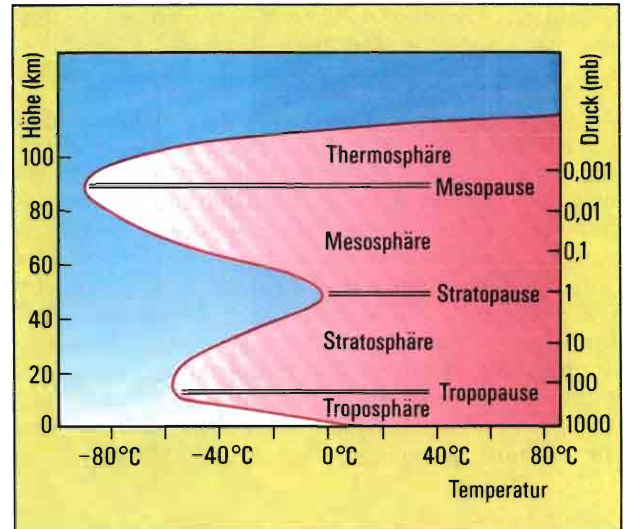


Abb. 1: Vertikale Temperaturverteilung und Einteilung der Erdatmosphäre (2)

Prozesse bestimmt wird. In vertikaler Richtung zeigt die Temperatur eine charakteristische Verteilung (vgl. Abb. 1 (1)), die von der geographischen Breite sowie von der Jahreszeit abhängig ist.

Die vertikale Temperaturverteilung weist zwei markante Temperaturminima auf, die in den tropischen Breiten in Höhen von 17 km und 85 km liegen. Dazwischen findet sich ein Temperaturmaximum in einer Höhe von 50 km. Der Umkehrpunkt des vertikalen Temperaturgradienten<sup>2)</sup> in 17 km Höhe wird als Tropopause, der in 50 km Höhe als Stratopause und der in 85 km als Mesopause bezeichnet. Die unterhalb der Tropopause liegende Luftschicht ist als Troposphäre, die zwischen der Tropopause und Stratopause liegende Schicht als Stratosphäre und die zwischen Stratopause und Mesopause liegende Schicht als Mesosphäre definiert.

Die Höhe der Tropopause ist von der geographischen Breite, der Jahreszeit und den vorherrschenden meteorologischen Bedingungen abhängig. Die Tropopausenhöhen ist mit mittleren Werten von etwa 8 km über den Polen am niedrigsten und erreicht ihr Maximum (17 km) in Äquatornähe. Die Tropopausenhöhe steigt zwischen den Polen und den Tropen nicht linear, sondern stufenweise an. Derartige Stufen oder „Tropopausenbrüche“ treten in den Subtropen (etwa bei 30° Breite) und mittleren/hohen Breiten (etwa bei 60° Breite) auf. An diesen Tropopausenbrüchen erfolgt bevorzugt der turbulente Austausch von Luft zwischen der Stratosphäre und der Troposphäre.

In der Troposphäre nimmt die Temperatur mit der Höhe im Durchschnitt um etwa 6,5°C pro km ab. Im Bereich der Tropopause kehrt sich der Temperaturgradient um und ist in der gesamten Stratosphäre positiv. Die Ursache für diesen Temperaturanstieg mit zunehmender Höhe ist die Aufheizung der Stratosphäre durch die direkte Absorption von kurzwelligem Sonnenlicht durch das Ozon in der Stratosphäre.

<sup>2)</sup> vertikaler Temperaturgradient = Änderung der Temperatur mit der Höhe

Dabei wird die tödliche solare UV-Strahlung in Wärme umgesetzt.

Wegen der unterschiedlichen vertikalen Temperaturgradienten unterscheiden sich der vertikale Austausch und der Transport von Luftmassen in diesen Schichten ganz erheblich. Während die Troposphäre im Mittel einmal in drei Wochen vertikal durchmischt wird, liegt die entsprechende Mischungszeit für die Stratosphäre wegen des dort angetroffenen positiven Temperaturgradienten im Bereich von einigen Jahren. Die Geschwindigkeit, mit der sich die vertikale Durchmischung der Atmosphäre vollzieht, wird in der Regel durch die Größe des turbulenten Diffusionskoeffizienten beschrieben, der im Bereich der Troposphäre bei einigen 100 000 Quadratcentimetern pro Sekunde liegt. Im Bereich der Tropopause sinkt der turbulente Diffusionskoeffizient wegen der Umkehr des Temperaturgradienten auf etwa 1000 Quadratcentimeter pro Sekunde oder um den Faktor 100 ab. Die daraus resultierende charakteristische Zeit für die Einmischung von Luft aus der Troposphäre in die Stratosphäre liegt im Bereich von ein bis zwei Jahren. Sie ist gegenüber der Durchmischungszeit von etwa drei Wochen in der Troposphäre sehr lang, so daß Troposphäre und Stratosphäre als getrennte Bereiche betrachtet werden können, die dynamisch nur schwach miteinander gekoppelt sind. Dementsprechend weisen die chemischen Zusammensetzungen der Stratosphäre und der Troposphäre erhebliche Unterschiede auf.

Dem vertikalen turbulenten Austausch von Luftmassen ist eine mittlere Strömung der Atmosphäre überlagert, die sich aus den beobachteten Windfeldern herleiten läßt. Diese mittlere oder globale Zirkulation der Atmosphäre ist stark von geographischer Breite und Länge, der Höhe und der Jahreszeit abhängig und wird zusätzlich durch regionale Effekte, zum Beispiel die Existenz von Gebirgsketten, beeinflusst. Hohe zonale Windgeschwindigkeiten werden in der oberen Troposphäre beobachtet. In dieser Schicht sind Windgeschwindigkeiten von über 100 Kilometer pro Stunde keine Seltenheit. Dementsprechend schnell vermischen sich auch die Luftmassen innerhalb jeder Hemisphäre; im Falle der mittleren Breiten der Nordhemisphäre liegen die Mischzeiten bei etwa 21 Tagen. Dagegen ist der meridionale Austausch von Luftmassen in der Troposphäre, das heißt der Transport in Nord-Süd-Richtung, mit etwa drei Monaten für die Nordhemisphäre relativ langsam. Noch größer ist die entsprechende Zeitkonstante für den Austausch zwischen den beiden Hemisphären, die auf ein bis zwei Jahre geschätzt wird.

Dieser relativ langsame Austausch der Luftmassen zwischen den beiden Hemisphären hat zur Folge, daß sich die vornehmlich in der Nordhemisphäre, zum Beispiel durch anthropogene Aktivitäten, emittierten Spurenstoffe in der Nordhemisphäre anreichern und dort höhere Konzentrationen als auf der Südhemisphäre aufweisen. Der Konzentrationsunterschied ist neben der geographischen Verteilung der Quellen und ihrer Quellstärken auch von der mittleren Verweilzeit des betreffenden Spurenstoffes abhängig. Große Unterschiede zwischen beiden Hemisphären werden in den Konzentrationen solcher Spurenstoffe

beobachtet, deren mittlere Verweilzeit kleiner als die mittlere Austauschzeit zwischen den Hemisphären ist.

### 1.3 Chemische Zusammensetzung der Atmosphäre

Die Erdatmosphäre besteht aus einem Gemisch unterschiedlicher Gase sowie fester und flüssiger Teilchen, die zum Teil in stark unterschiedlichen Konzentrationen vorliegen und unterschiedliche Verteilungen aufweisen. Hauptbestandteile der Atmosphäre sind der Stickstoff ( $N_2$ ) und der Sauerstoff ( $O_2$ ), die in trockener Luft einen Volumenanteil von etwa 78 Prozent beziehungsweise 21 Prozent stellen. Mit weitem Abstand (etwa 1,3 Prozent) folgt der Wasserdampf ( $H_2O$ ), der im wesentlichen in der unteren Troposphäre vorkommt und dessen Konzentration in der Atmosphäre räumlich und zeitlich stark schwankt. Bei hohen Temperaturen, wie etwa in den Tropen, kann dieser Anteil auf Werte von bis zu 3 Prozent ansteigen. Dagegen sinkt der  $H_2O$ -Gehalt in der Stratosphäre auf wenige ppmv ab.

Zusammengenommen stellen diese vier Gase mehr als 99,9 Prozent des Volumens der Erdatmosphäre. Der Rest von weniger als 0,1 Prozent verteilt sich auf eine Vielzahl von Substanzen, die nur in sehr geringen Mengen angetroffen werden und deshalb als Spurengase beziehungsweise Spurenstoffe bezeichnet werden. In Tabelle 1 sind einige Spurengase beispielhaft unter Angabe ihrer Konzentrationen in der Troposphäre und ihrer potentiellen Quellen aufgeführt. Diese Liste läßt sich um eine Vielzahl weiterer Spurenschubstanzen ergänzen, deren Konzentrationen in der Regel allerdings so extrem niedrig sind, daß sie selbst bei Einsatz der empfindlichsten zur Zeit verfügbaren Meßinstrumente nicht nachweisbar sind. Zu diesen Substanzen gehören unter anderem viele der in der Atmosphäre photochemisch gebildeten und luftchemisch wichtigen Verbindungen. Hierzu gehören auch die reaktiven freien Radikale wie O, OH,  $HO_2$ , Cl und  $NO_3$ , die für die chemische Umsetzung in der Atmosphäre eine entscheidende Rolle spielen.

Obwohl diese Spurenschubstanzen – die klimarelevanten Spurengase eingeschlossen – in der Erdatmosphäre nur einen Volumenanteil von insgesamt noch nicht einmal 0,1 Prozent haben, sind sie für das Leben auf der Erde von entscheidender Bedeutung. Sie bestimmen das Klima, absorbieren die lebensgefährliche UV-Strahlung der Sonne, tragen zum Zyklus vieler Nährstoffe bei, beeinflussen die Niederschlagsverteilung und machen dadurch insgesamt das Leben auf der Erde erst möglich.

Die Erdatmosphäre hat sich ebenso wie die Atmosphären der anderen Planeten des Sonnensystems durch Gase aus dem Inneren des Planeten entwickelt. Hätten sich diese Gase im Verlaufe geologischer Zeiträume einfach akkumuliert, so hätte die Erdatmosphäre eine ähnliche Zusammensetzung wie die Atmosphären der Nachbarplaneten Venus und Mars. Auf diesen Planeten dominiert das  $CO_2$ , während in der heutigen Erdatmosphäre dieses Gas mit einem Mischungsverhältnis von 354 ppmv (vgl. Tabelle 1) lediglich zu den Spurengasen zählt.

Tabelle 1

**Chemische Zusammensetzung der trockenen troposphärischen Luft (3).  
Das Bezugsjahr ist 1989.**

	Gas	Mischungsverhältnis <sup>1)</sup>	Quellen <sup>2)</sup>
Stickstoff .....	N <sub>2</sub>	78,1 %	V, B
Sauerstoff .....	O <sub>2</sub>	20,9 %	B
Argon .....	Ar	0,93 %	R
Kohlendioxid .....	CO <sub>2</sub>	354 ppmv	V, B, A
Neon .....	Ne	18,2 ppmv	V
Helium .....	He	5,2 ppmv	R
Krypton .....	Kr	1,1 ppmv	R
Xenon .....	Xe	0,09 ppmv	R
Methan .....	CH <sub>4</sub>	1,72 ppmv	B, A
Wasserstoff .....	H <sub>2</sub>	0,5 ppmv	P, B, A
Distickstoffoxid .....	N <sub>2</sub> O	310 ppbv	B, A, P
Ozon <sup>3)</sup> .....	O <sub>3</sub>	10–100 ppbv <sup>4)</sup>	P
Schwefeldioxid <sup>3)</sup> .....	SO <sub>2</sub>	bis 0,2 ppbv <sup>4)</sup>	V, A, P
Stickstoffdioxid <sup>3)</sup> .....	NO <sub>2</sub>	10–100 pptv <sup>4)</sup>	P, B
Stickstoffoxid <sup>3)</sup> .....	NO	5–100 pptv <sup>4)</sup>	P, A, B
Ammoniak <sup>3)</sup> .....	NH <sub>3</sub>	0,1–1 ppbv	B, A
Kohlenmonoxid <sup>3)</sup> .....	CO	40–150 ppbv <sup>4)</sup>	B, P, A
Salpetersäure .....	HNO <sub>3</sub>	50–1 000 pptv <sup>4)</sup>	P
Formaldehyd .....	HCHO	0,1–1 ppbv	P, A
FCKW 11 .....	CFCl <sub>3</sub>	280 pptv	A
FCKW 12 .....	CF <sub>2</sub> Cl <sub>2</sub>	480 pptv	A

1) Mischungsverhältnisse (Molenbrüche) sind bei geringerer Häufigkeit der Komponente angegeben in ppmv = 10<sup>-6</sup>, ppbv = 10<sup>-9</sup>, pptv = 10<sup>-12</sup>.

2) V = Vulkanismus, B = Biosphäre, E = Verdunstung, R = Radioaktiver Zerfall, A = Anthropogene Emission, P = Photochemie.

3) Spurengase mit stark schwankenden Mischungsverhältnissen.

4) Außerhalb von Belastungsgebieten, in denen noch höhere Konzentrationen auftreten.

Der Grund für den drastischen Entzug von CO<sub>2</sub> aus der Erdatmosphäre ist die Bildung von Karbonatgesteinen und der Biomasse, durch die CO<sub>2</sub> in Form von anorganischem und organischem Kohlenstoff gebunden wird. Nur die Erde hat eine Entfernung von der Sonne, bei der die Kondensation des H<sub>2</sub>O-Dampfes und die Ausbildung der Ozeane möglich war. Wegen seiner hohen Wasserlöslichkeit wurde das CO<sub>2</sub> durch den Niederschlag „ausgewaschen“ und in den Ozean transportiert, wo es in Form von Karbonat im Sediment gespeichert wurde. Auf diese Weise wurde eine Anreicherung des CO<sub>2</sub> in der Erdatmosphäre verhindert.

Eine weitere Besonderheit der Erdatmosphäre ist ihr hoher Sauerstoffgehalt. Nach heutiger Auffassung ist O<sub>2</sub> kein Bestandteil der durch Ausgasung entstandenen Uratmosphäre. Sauerstoff ist das Ergebnis der photosynthetischen Aktivität der Biosphäre und hat sich über geologische Zeiträume hinweg in der Atmosphäre akkumuliert. Die durch Photosynthese erzeugte Gesamtmenge ist aber nur zu einem Anteil von etwa vier Prozent als freier Sauerstoff in der Atmosphäre vorhanden. Sauerstoff ist das Ausgangsprodukt für die Bildung von Ozon, das die solare UV-

Strahlung in der Stratosphäre absorbiert und dadurch Leben in der jetzt auf der Erde angetroffenen Form ermöglicht. Darüber hinaus bestimmt das Ozon das Oxidationspotential der Troposphäre und beeinflusst damit die chemische Zusammensetzung der Troposphäre, so zum Beispiel die Konzentrationen von Methan, Kohlenmonoxid, Kohlenwasserstoffen und anderen, die direkt oder indirekt klimawirksam sind.

Die in der Atmosphäre enthaltenen Gase (mit Ausnahme der Edelgase) bewegen sich in einem Kreislauf, der die Konzentration und Verteilung der einzelnen Spurenstoffe bestimmt. Diese Gase, einschließlich des Sauerstoffs und Stickstoffs, werden

- laufend durch eine Vielzahl unterschiedlicher biologischer, chemischer oder physikalischer Prozesse gebildet,
- in die Atmosphäre emittiert,
- dort durch die allgemeine Zirkulation verteilt und
- nach ihrer chemischen Umwandlung durch Niederschlag oder trockene Deposition wieder aus der Atmosphäre entfernt.

In Anbetracht der verschiedenen an diesen Kreisläufen beteiligten biologischen und geochemischen Prozesse spricht man auch von „bio-geochemischen Kreisläufen“.

Zwischen den globalen Emissions- und Depositionsraten eines Spurenstoffs stellt sich ein dynamisches Gleichgewicht ein, das über die Verteilung und die Konzentration dieses Stoffes in der Atmosphäre entscheidet. Jede Störung des bio-geochemischen Kreislaufes durch den Menschen, sei es durch zusätzliche Emissionen oder durch Beeinflussung natürlicher Produktions- beziehungsweise Abbauprozesse, stellt ein neues Gleichgewicht her und ändert damit die Konzentration und Verteilung. Da die bio-geochemischen Kreisläufe nahezu aller atmosphärischer Spurengase miteinander gekoppelt sind, können sich anthropogene Eingriffe in den Kreislauf einzelner Spurengase auf die Konzentration und Verteilung anderer Spurenstoffe auswirken. So können unter anderem atmosphärische Spurengase, die kaum eine direkte Klimarelevanz besitzen, wie zum Beispiel das Kohlenmonoxid (CO), die Stickoxide oder Kohlenwasserstoffe, durch photochemische Reaktionen in der Troposphäre zur Bildung von Ozon führen, das wiederum sehr klimarelevant ist.

Wegen der Existenz der bio-geochemischen Kreisläufe verweilen die einzelnen Gas-Moleküle nur für eine die jeweilige Spurenspezies charakteristische Zeit in der Atmosphäre, die als „mittlere Lebensdauer“ oder „mittlere Verweilzeit“ bezeichnet wird. Die mittlere Verweilzeit eines Spurenstoffs in der Atmosphäre ist die Zeit, in der sich eine in die Atmosphäre eingebrachte Menge des betreffenden Spurenstoffes um etwa zwei Drittel vermindert hat. Sie berechnet sich aus dem Gehalt des betreffenden Spurenstoffes in der Atmosphäre und seiner globalen Emissions- beziehungsweise Depositionsraten. Sie schwankt für verschiedene Spurenstoffe zwischen mehreren tausend Jahren, wie im Falle des Sauerstoffs, und wenigen Sekunden, wie im Falle des sehr reaktiven OH-Radikals.

Die mittleren Verweilzeiten der wichtigsten klimarelevanten Spurengase in der Troposphäre liegen bei 150 Jahren ( $\text{N}_2\text{O}$ ), 130 Jahren ( $\text{CF}_2\text{Cl}_2$  oder FCKW 12), 60 Jahren ( $\text{CFCl}_3$  oder FCKW 11), 8 bis 10 Jahren (Methan) und wenigen Monaten (troposphärisches Ozon). Das atmosphärische  $\text{CO}_2$  ist an zwei Kohlenstoff-Kreisläufen beteiligt, und zwar dem biosphärischen Kreislauf und dem geochemischen Kreislauf. Der biosphärische Kohlenstoff-Kreislauf ist durch die Photosyntheserate der Biosphäre sowie durch die Mineralisationsrate der toten Biomasse bestimmt. In diesem Kreislauf wird das atmosphärische Kohlendioxid relativ schnell, das heißt einmal in etwa fünf Jahren, umgesetzt. Dagegen wird die Umwälzrate im geochemischen Kohlenstoff-Kreislauf im wesentlichen durch den Austausch von Kohlenstoff zwischen der Atmosphäre und dem Tiefenwasser der Ozeane sowie dem Sediment bestimmt. Dieser Austausch erfolgt relativ langsam; entsprechend langsam ist die Umwälzrate des atmosphärischen  $\text{CO}_2$ , die im Mittel auf einmal in etwa 120 Jahren geschätzt wird.

Entsprechend ihrer Verweilzeit zeigen die Spurengase stark unterschiedliche Verteilungen in der Atmo-

sphäre. So sind chemisch stabile Gase, wie beispielsweise der Sauerstoff, der Stickstoff oder die Edelgase, bis in Höhen von 85 km gleichmäßig durchmischt. Erst oberhalb dieser Höhe bewirken die Schwerkraft der Erde sowie die energiereiche solare UV-Strahlung eine Änderung der vertikalen Verteilung der Mischungsverhältnisse. Die Spurengase mit Lebenszeiten in der Größenordnung von hundert Jahren sind nur noch in der Troposphäre, das heißt in Höhenschichten bis zu 10 bis 18 km, gleichmäßig verteilt. In der darüber liegenden Stratosphäre zeigen sie aber zum Teil stark ausgeprägte Änderungen der Konzentration mit der Höhe, deren Ursachen sowohl in der schwachen vertikalen Durchmischung der Stratosphäre als auch in den relativ großen lokalen Abbauraten zu suchen sind. Im Gegensatz hierzu schwanken die Konzentrationen der Spurengase mit Lebensdauer von weniger als einigen Wochen auch in der Troposphäre räumlich und zeitlich stark. Die Angaben über mittlere globale Konzentrationen werden hierdurch erschwert und sind in vielen Fällen nicht möglich.

Da die meisten klimarelevanten Spurengase relativ lange mittlere Verweilzeiten haben, reagieren die atmosphärischen Konzentrationen dieser Gase nur langsam auf Änderungen der Emissions- beziehungsweise Depositionsraten. Um diese zeitlichen Änderungen abschätzen zu können, müssen die Quellen und Senken sowie die entsprechenden Flußraten der betreffenden Gase mit ausreichender Genauigkeit bekannt sein.

## 1.4. Kreisläufe klimarelevanter Spurengase in der Atmosphäre

### 1.4.1 Wasserdampf

Das Wasser in der Atmosphäre bildet ein recht komplexes dynamisches System, in dem die verschiedenen Aggregatzustände Dampf, Flüssigwassertropfen und Eiskristalle in permanenter Wechselwirkung miteinander stehen. In allen diesen Aggregatzuständen ist das atmosphärische Wasser klimarelevant. Die verbreitetste Form des atmosphärischen Wassers ist der Wasserdampf, durch den Verdunstungswärme von der Erdoberfläche in die Atmosphäre transportiert wird. Weiterhin hat der Wasserdampf starke Absorptionsbanden<sup>1)</sup> im Wärmestrahlungsbereich der Erde und trägt dadurch zum natürlichen Treibhauseffekt bei. Mit einem Anteil von 65 Prozent am natürlichen Treibhauseffekt ist der Wasserdampf das wichtigste Treibhausgas.

Der Wasserdampf ist in geologischen Zeiträumen durch thermisches Ausgasen aus dem Erdinnern in die Atmosphäre abgegeben worden und hat sich nach Kondensation und Ausregnen in den Ozeanen akkumuliert. Zur Zeit verteilt sich die gesamte auf der Erde angetroffene Wassermenge auf vier Reservoirs, und zwar auf

<sup>1)</sup> Absorptionsbande = Bereich des Strahlungsspektrums, in dem ein Spurengas die Strahlung stark absorbiert, also in Wärme umwandelt.

- die Atmosphäre,
- den Ozean,
- die Kontinente und
- das Polareis.

Von der gesamten Wassermasse sind 94 Prozent in den Ozeanen, 2 Prozent im Polareis sowie 4 Prozent auf den Kontinenten, hier in Form von Grundwasser, Seen und Flüssen, gespeichert. Der Anteil der gesamten Wassermasse in der Atmosphäre beträgt lediglich 9 ppmv und ist nahezu ausschließlich auf die untere Troposphäre verteilt.

Der atmosphärische Wasserdampf durchläuft einen schnellen Kreislauf, der in Abbildung 2 schematisch dargestellt ist. Die wesentliche Quelle für atmosphärischen Wasserdampf ist die Verdunstung von Wasser an der Erdoberfläche und durch die Ozeane. Die Verdunstungsrate und damit der Fluß von Wasser in die Atmosphäre wird durch den Wasserdampfdruck bestimmt, der seinerseits annähernd exponentiell mit steigender Temperatur zunimmt. Die einzige nennenswerte Senke ist die Kondensation des Wasserdampfs mit nachfolgendem Ausregnen des Wassers. Kondensation setzt ein, wenn der Sättigungsdampfdruck des Wassers erreicht beziehungsweise überschritten wird. Eine wichtige Rolle spielen dabei die

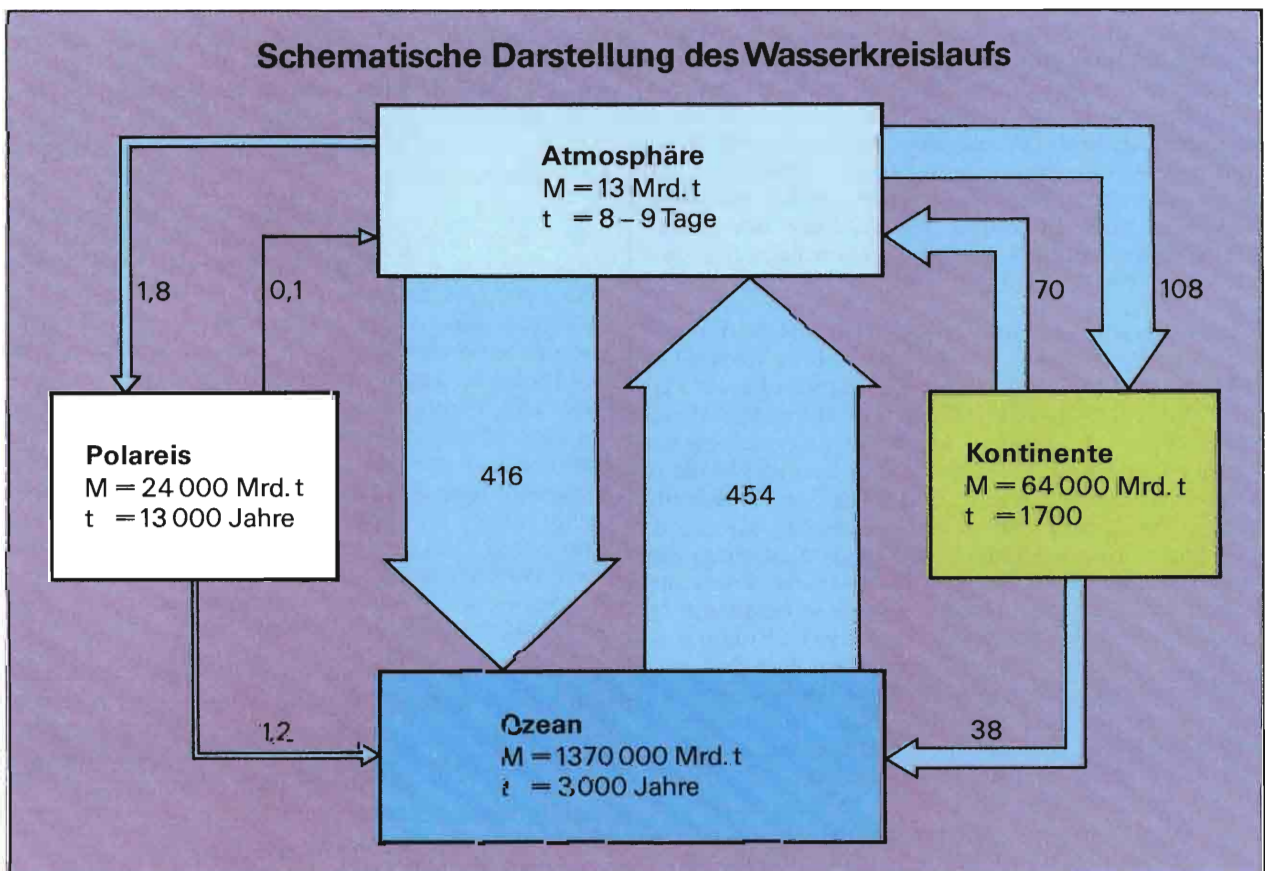


Abb. 2: Schematische Darstellung des Wasserkreislaufs.

Die Flüsse zwischen den einzelnen Reservoirs sind in Milliarden Tonnen Wasser pro Jahr angegeben. t bezeichnet die Lebenszeit und M die Masse des Wassers innerhalb der Reservoirs.

Kondensationskerne, das heißt luftgetragene Partikel, an denen sich der Wasserdampf bevorzugt anlagert.

Insgesamt werden im Mittel 525 Milliarden Tonnen Wasserdampf pro Jahr durch die Verdunstung in die Atmosphäre emittiert (4). Davon werden 454 Milliarden Tonnen pro Jahr beziehungsweise 87 Prozent aus den Ozeanen freigesetzt, die mehr als zwei Drittel der Erdoberfläche bedecken. Von besonderer Bedeutung sind die tropischen Ozeane, speziell der Indische Ozean und der westliche Pazifik, in denen die höchsten Temperaturen des Oberflächenwassers angetroffen werden. Lediglich 13 Prozent des weltweit in die

Atmosphäre emittierten Wasserdampfs oder 70 Milliarden Tonnen werden pro Jahr über den Kontinenten abgegeben, und zwar vornehmlich durch die Verdunstung aus der Vegetation, aus Böden sowie aus Flüssen und Seen. Eine verhältnismäßig geringe, aber mit der Zeit zunehmende Quelle des atmosphärischen Wasserdampfs ist die Bewässerung landwirtschaftlich genutzter Flächen. Wasserdampf wird auch durch die Verbrennung von fossilen Brennstoffen, Biomasse sowie durch andere energieproduzierende Prozesse in die Atmosphäre emittiert. Jedoch spielen diese Quellen im Vergleich zum natürlichen hydrologischen Zyklus nur eine untergeordnete Rolle. Dieses gilt nicht

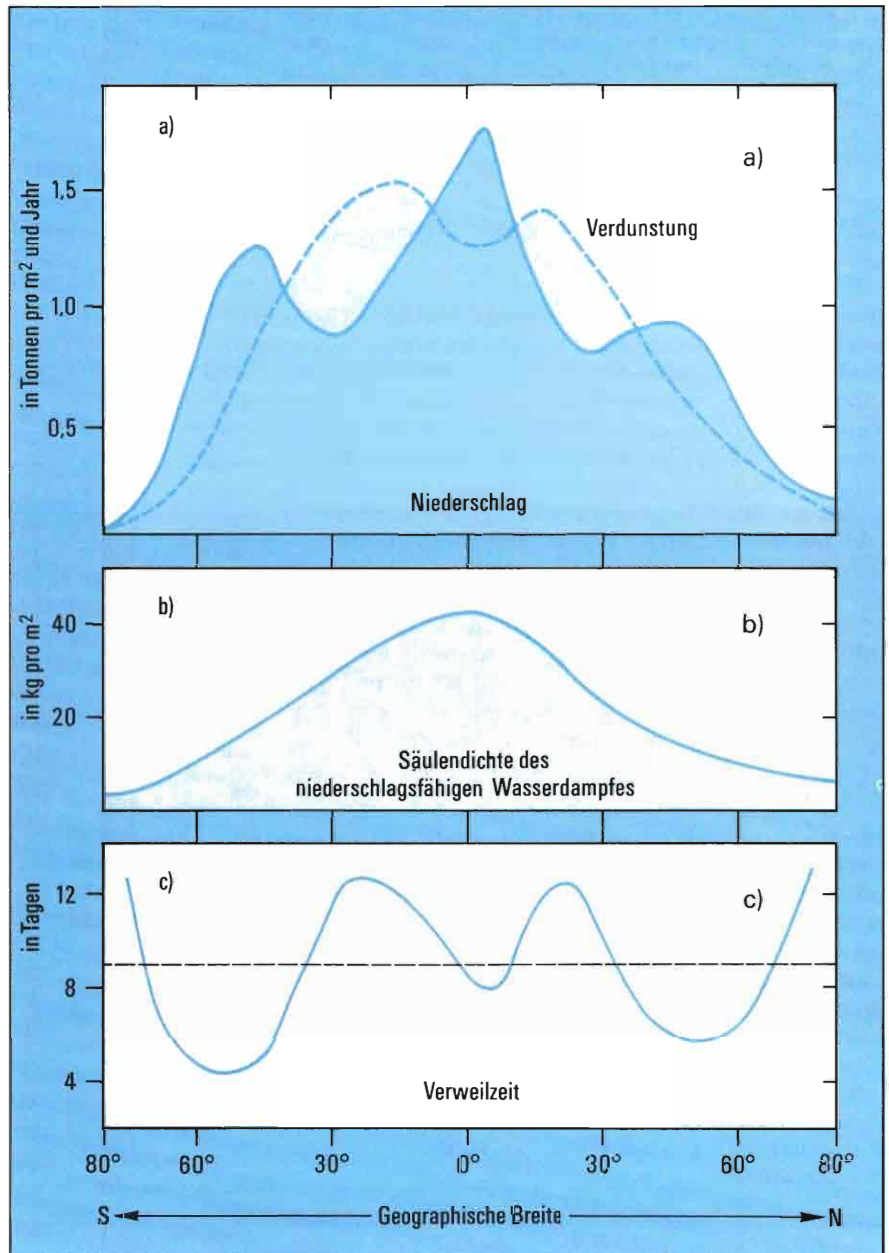


Abb. 3: Breitenabhängige Daten des Wasserkreislaufes (6).

Oben: Jahresmittel der Verdunstungsraten (E) und der Niederschlagsraten (R);

Mitte: Mittlere jährliche Säulendichten des niederschlagsfähigen Wasserdampfes (precipitable water vapor, W);

Unten: Mittlere troposphärische Verweilzeiten des Wasserdampfes (berechnet aus (a) und (b) nach  $t=W/R$ ; die gestrichelte Linie ist der globale Mittelwert)

für den Flugverkehr in der oberen Troposphäre und unteren Stratosphäre, in der die Verbrennung des Treibstoffs die einzige lokale Quelle für Wasserdampf ist und dementsprechend einen signifikanten Einfluß auf die Konzentration und Verteilung des Wasserdampfs in dieser Höhe ausübt (5).

Von dem insgesamt in die Atmosphäre emittierten Wasserdampf regnen 416 Milliarden Tonnen pro Jahr über den Ozeanen aus. Das sind 39 Milliarden Tonnen weniger, als durch die Verdunstung aus den Ozeanen aufsteigt. Der Rest fällt größtenteils als Niederschlag in Form von Regen und Schnee auf die Kontinente und wird durch die Flüsse wieder den Ozeanen zugeführt. Interessant – insbesondere im Hinblick auf die spätere Diskussion über die mögliche Auswirkung einer Klimaänderung – ist die Tatsache, daß 65 Prozent der über den Kontinenten niedergehenden Niederschlagsmengen dort wieder durch Verdunstung in die Atmosphäre abgegeben wird und nur 35 Prozent über die Flüsse abfließen. Bereits geringe Änderungen der globalen Temperatur – gerade bei Berücksichtigung der exponentiellen Abhängigkeit der Verdunstungsrate von der Temperatur – können sich deshalb bereits signifikant auf die Wasserführung der Flüsse sowie auf den Grundwasserspiegel auswirken.

In der Atmosphäre sind insgesamt 13 Milliarden Tonnen Wasserdampf gespeichert, wobei die Hauptmasse des Wasserdampfs wegen der starken Temperaturabhängigkeit des Sättigungsdampfdrucks in der tropischen Troposphäre zwischen 30°N und 30°S angetroffen wird. Bei einer Verdunstungsrate von 525 Milliarden Tonnen pro Jahr berechnet sich die mittlere Verweildauer des Wasserdampfs in der Atmosphäre zu acht bis neun Tagen. Wegen der starken Breitenabhängigkeit der Verdunstungsraten, der Niederschlagsraten sowie der Säulendichte des atmosphärischen Wasserdampfs (vgl. Abbildung 3) schwankt die mittlere Verweildauer des Wasserdampfs zwischen vier Tagen in mittleren Breiten und bis zu mehr als zwölf Tagen über den Polen. Die Verweilzeit des Wassers in den übrigen Reservoiren ist dagegen mit Werten von bis zu 13000 Jahren im Polareis erheblich größer (vgl. Abbildung 2).

Aufgrund der kurzen mittleren Verweilzeit und der Abhängigkeit der Verdunstungsraten von der Temperatur zeigt die atmosphärische Wasserdampf-Konzentration erhebliche jahreszeitliche und kurzfristige Schwankungen. Relativ niedrige Werte werden in den ariden Regionen der Subtropen beobachtet, die durch absinkende Luftmassen in der Troposphäre und damit durch trockene Luft gekennzeichnet sind. Hohe H<sub>2</sub>O-Konzentrationen werden dagegen in warmen, aufsteigenden Luftmassen – etwa in Tiefdruckgebieten – angetroffen. Generell nimmt die H<sub>2</sub>O-Konzentration in der Troposphäre mit der Höhe sowie mit zunehmender Breite ab.

Ein Minimum der H<sub>2</sub>O-Konzentration wird in der unteren Stratosphäre angetroffen. Ursache für das H<sub>2</sub>O-Minimum ist die globale Zirkulation, mit der Luft aus der Troposphäre vornehmlich durch die tropische Tropopause in die Stratosphäre transportiert wird. Dabei muß die Luft die kalte Tropopausenschicht durchqueren, die bei Temperaturen um –80°C als Kältefalle wirkt. Bei diesen Temperaturen beträgt der Wasser-

dampfpartialdruck nur noch 0,5 tausendstel hpa<sup>1)</sup>, was bei einem Luftdruck von 120 hpa einer H<sub>2</sub>O-Konzentration von etwa 5 ppmv entspricht. Die in der Stratosphäre gemessenen H<sub>2</sub>O-Konzentrationen schwanken zwischen 2 und 10 ppmv (7), wobei die Mittelwerte mit der Höhe bis in etwa 40 km leicht ansteigen. Dieser Anstieg ist mit großer Wahrscheinlichkeit eine Folge der chemischen Oxidation wasserstoffhaltiger Verbindungen (z. B. CH<sub>4</sub>, H<sub>2</sub>), die durch die globale Zirkulation aus der Troposphäre in die Stratosphäre transportiert werden. Eine zunehmende CH<sub>4</sub>-Konzentration in der Troposphäre kann demnach zu einer Zunahme des H<sub>2</sub>O-Gehalts der Stratosphäre führen, die sich wiederum auf die vermehrte Ausbildung von Eiswolken über den Polargebieten (PSCs = polar stratospheric clouds) auswirken kann. Wie in Abschnitt D näher ausgeführt, sind die PSCs für die Ausbildung des antarktischen Ozonlochs von eminenter Bedeutung.

#### 1.4.2 Kohlendioxid

Nach dem troposphärischen Wasserdampf ist das Kohlendioxid (CO<sub>2</sub>) das wichtigste unter den klimarelevanten atmosphärischen Spurengasen. In der Troposphäre ist das CO<sub>2</sub> wegen seiner relativ langen Verweilzeit gut durchmischt. Änderungen der troposphärischen CO<sub>2</sub>-Konzentration lassen sich deshalb bereits mit Hilfe weniger über die Erde verteilter Stationen mit ausreichender Auflösung erfassen.

Das troposphärische CO<sub>2</sub> wird seit 1958 an einer wachsenden Zahl von Stationen regelmäßig gemessen (8). Gegenwärtig beträgt die mittlere troposphärische CO<sub>2</sub>-Konzentration 354 ppmv (mit leicht höheren Werten in der Nordhemisphäre). Die Konzentration durchläuft einen Jahresgang, der im wesentlichen von der Biosphäre an Land bestimmt wird. Im Sommer überwiegt die CO<sub>2</sub>-Aufnahme aufgrund der verstärkten Photosynthese der Vegetation. Dadurch wird der Atmosphäre CO<sub>2</sub> entzogen, das im Herbst und Winter durch die mikrobielle Zersetzung (Mineralisation) der abgestorbenen Biomasse wieder in die Atmosphäre abgegeben wird. Die jahreszeitliche Schwankung der CO<sub>2</sub>-Konzentration ist relativ klein. Sie liegt in der Südhemisphäre bei 1,2 ppmv, wächst aber in der Nordhemisphäre auf maximal 15 ppmv in der Breitenzone der borealen Wälder (55 bis 65°N) an.

Diesen jahreszeitlichen Schwankungen sind längerfristige Variationen in der Größenordnung von 1 ppmv über einen Zeitraum von mehreren Jahren überlagert, die unter anderem mit dem El Niño-Phänomen korreliert sind (9). Diese Korrelation deutet bereits auf eine enge Beziehung zwischen der troposphärischen CO<sub>2</sub>-Verteilung und der Meereszirkulation (10) beziehungsweise auf eine direkte Kopplung des CO<sub>2</sub> Gehalts der Atmosphäre mit dem des Ozeans hin.

Das atmosphärische CO<sub>2</sub> unterliegt einem biosphärischen Kreislauf, der Bestandteil des globalen geochemischen Kohlenstoff-Kreislaufs ist. In diesem in Abbildung 4 schematisch dargestellten geologischen Kohlenstoff-Kreislauf wird Kohlenstoff in Form von CO<sub>2</sub>,

<sup>1)</sup> 1 hpa (Hektopascal) = 1 mb (Millibar) = 1 tausendstel Bar ist eine Einheit für den Druck



Karbonaten und organischen Kohlenstoff-Verbindungen zwischen mehreren Kohlenstoff-Reservoirien ausgetauscht. Wichtige Kohlenstoff-Reservoirien sind die Atmosphäre, die Ozeane, die terrestrische und marine Biosphäre und die Sedimente (11). Der den atmosphärischen  $\text{CO}_2$ -Gehalt bestimmende Kohlenstoff-Austausch zwischen der Atmosphäre einerseits und den Ozeanen sowie der terrestrischen Biosphäre andererseits erfolgt hauptsächlich über das  $\text{CO}_2$  (12). Substanzen wie  $\text{CO}$ , Nicht-Methan-Kohlenwasserstoffe und andere spielen dabei nur eine untergeordnete Rolle.

In den einzelnen Reservoirien werden stark voneinander abweichende Kohlenstoff-Mengen gespeichert. So enthält die Atmosphäre gegenwärtig etwa 750 Milliarden Tonnen Kohlenstoff, der nahezu ausschließlich als  $\text{CO}_2$  vorliegt. In den Ozeanen sind dagegen mehr als fünfzigmal soviel, nämlich 39 000 Milliarden Tonnen Kohlenstoff in Form von Karbonaten beziehungsweise Bikarbonat, gelöst. Allein in der obersten Mischungsschicht der Ozeane ist schon soviel Kohlenstoff gespeichert wie in der gesamten Atmosphäre. Etwa 1 000 Milliarden Tonnen Kohlenstoff sind in der gesamten lebenden Biomasse und 1 750 Milliarden Tonnen Kohlenstoff in der abgestorbenen (und im Boden als Humus beziehungsweise Torf vorliegenden) Biomasse gebunden.

Der Kohlenstoff wird zwischen den einzelnen Reservoirien mit extrem unterschiedlichen Raten ausgetauscht. So ist der Eintrag von biogenem Kohlenstoff in die Sedimente mit einer jährlichen Flußrate von 0,1 Milliarden Tonnen mehr als tausendmal langsamer als der Austausch von Kohlenstoff zwischen der Atmosphäre und der Biosphäre beziehungsweise der Atmosphäre und dem Oberflächenwasser der Ozeane (vgl. Abbildung 4).

Dementsprechend unterscheiden sich auch die mittleren Aufenthaltszeiten des Kohlenstoffs in den einzelnen Reservoirien ganz erheblich und schwanken zwischen vielen Millionen Jahren in den Sedimenten und wenigen Jahren für den atmosphärischen Kohlenstoff.

Die atmosphärische  $\text{CO}_2$ -Konzentration wird im wesentlichen durch den Austausch zwischen dem in der Atmosphäre enthaltenen Kohlenstoff und dem in der Biomasse gebundenen sowie im Wasser der Ozeane gelösten Kohlenstoff-Anteil bestimmt. Der Austausch von Kohlenstoff zwischen der Biomasse und der Atmosphäre wird durch die Photosynthese „angetrieben“, durch die Kohlendioxid unter Nutzung der solaren Energie in Biomasse überführt wird. Der so als Biomasse gespeicherte Kohlenstoff wird einmal durch die Veratmung (autotrophe Respiration) und zum anderen durch die mikrobielle Zersetzung der abgestorbenen Biomasse (heterotrophe Respiration) wieder in  $\text{CO}_2$  überführt und in die Atmosphäre abgegeben. Der Austausch von Kohlenstoff zwischen der Atmosphäre und dem Oberflächenwasser der Ozeane erfolgt kontinuierlich in beiden Richtungen und wird durch das Karbonat/Bikarbonat-Gleichgewicht im Meerwasser sowie durch die Photosynthese des Phytoplanktons einerseits und die mikrobielle Zersetzung abgestorbener mariner Organismen andererseits bestimmt.

Die Netto-Aufnahme von atmosphärischem  $\text{CO}_2$  durch die Biosphäre wird als Netto-Primär-Produktion

(NPP) bezeichnet und entspricht der Differenz zwischen der Brutto-Primär-Produktion (BPP) von Biomasse und der autotrophen Respiration. Die durch die NPP produzierte Biomasse ist in der lebenden Biomasse, beispielsweise in Form der Wälder, oder in der toten Biomasse oder in Form von Humus oder Torf fixiert. Gemittelt über einen Zeitraum von mehr als einem Jahr entspricht die Netto-Primär-Produktion der durch die heterotrophe Respiration freigegebenen Kohlenstoff-Menge, das heißt, das atmosphärische  $\text{CO}_2$  befindet sich mit seinen Quellen und Senken in einem dynamischen Gleichgewicht.

Dieses Gleichgewicht wird derzeit durch den Menschen in unterschiedlicher Form und Intensität gestört. Die wohl bekannteste Form dieser Störung ist die Verbrennung von fossilem Kohlenstoff, der als Bestandteil des geochemischen Kohlenstoff-Kreislaufs in den Sedimenten gespeichert ist. Durch die thermische Nutzung des fossilen Kohlenstoffs wird der bestehende natürliche Kohlenstofffluß aus den Sedimenten in die Atmosphäre von normalerweise 0,1 Milliarden Tonnen um ein Vielfaches erhöht und dadurch zusätzlich  $\text{CO}_2$  in die Atmosphäre abgegeben. Im Jahr 1987 hat die anthropogene  $\text{CO}_2$ -Emission durch die Verbrennung fossiler Brennstoffe etwa 5,7 Milliarden Tonnen Kohlenstoff betragen. Sie liegt damit um den Faktor 60 über der entsprechenden natürlichen Flußrate. Dieser Faktor wird sich, bedingt durch den Anstieg der Nutzung fossiler Brennstoffe und der daraus resultierenden Zunahme der  $\text{CO}_2$ -Freisetzung, noch weiter erhöhen. Die Zuwachsrate beträgt derzeit zwei Prozent pro Jahr.

Zusätzlich wird  $\text{CO}_2$  durch die Rodung von Wäldern (zur Zeit vornehmlich in den tropischen Gebieten) und durch die landwirtschaftliche Nutzung ehemaliger Waldböden in die Atmosphäre emittiert. Durch die Überführung von natürlichen Waldbeständen in landwirtschaftlich genutzte Flächen wird der pro Flächeneinheit in der Biomasse fixierte Kohlenstoffgehalt um den Faktor 20 bis 100 reduziert und der Differenzbetrag durch Verbrennung oder mikrobielle Zersetzung der gerodeten Biomasse beziehungsweise durch die erhöhte Mineralisation des im Boden vorhandenen Humus als  $\text{CO}_2$  freigesetzt. Die auf diese Weise in die Atmosphäre zusätzlich emittierte  $\text{CO}_2$ -Menge wurde für das Jahr 1980 auf 0,5 bis 2,5 Milliarden Tonnen Kohlenstoff geschätzt (14). Wegen des gestiegenen Drucks auf die tropischen Wälder ist davon auszugehen, daß sich dieser Wert in den vergangenen Jahren wesentlich erhöht hat (15).

Zusätzlich können eine Klimaänderung oder der Einfluß anderer Streßfaktoren (zum Beispiel der Eintrag atmosphärischer Schadstoffe) zu signifikanten Veränderungen des in der terrestrischen Biomasse fixierten Kohlenstoffs und damit zu einer weiteren Erhöhung des  $\text{CO}_2$ -Flusses in die Atmosphäre führen. Da die in Frage kommenden Kohlenstoff-Reservoirien und -Flüsse groß sind, können sich schon relativ geringe Störungen erheblich auf den atmosphärischen  $\text{CO}_2$ -Gehalt auswirken (16).

Der durch den Menschen zusätzlich in die Atmosphäre abgegebene Kohlenstoff verteilt sich im wesentlichen auf die Kohlenstoff-Reservoirien der Atmosphäre und des Oberflächenwassers der Ozeane und

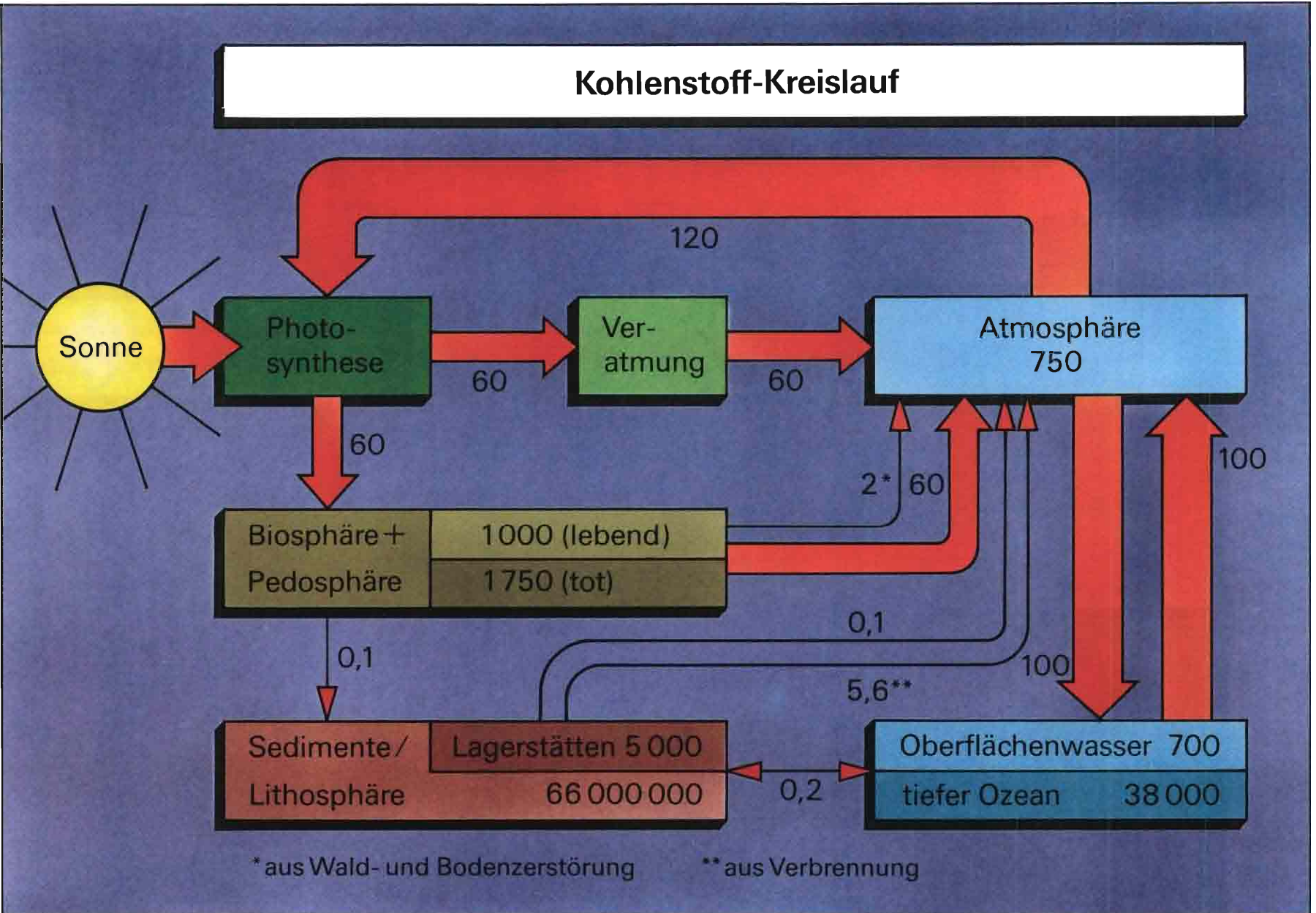


Abb. 4: Schematische Darstellung des geochemischen Kohlenstoff-Kreislaufs (13).

Die Zahlen bezeichnen Kohlenstoffflüsse in Milliarden Tonnen pro Jahr und Kohlenstoffreservoir in Milliarden Tonnen.

erhöht damit die in diesen Reservoiren gespeicherte Kohlenstoffmenge. Für die Atmosphäre bedeutet dies eine Erhöhung der  $\text{CO}_2$ -Konzentration, die von der Aufteilung des zusätzlich anthropogen emittierten Kohlendioxids auf die einzelnen Reservoirs abhängig ist. Es ist nicht auszuschließen, daß die zunehmende atmosphärische  $\text{CO}_2$ -Konzentration zu einer Steigerung der Photosyntheseraten der terrestrischen Biosphäre ( $\text{CO}_2$ -Düngung) und damit auch zu einer Zunahme des in der lebenden terrestrischen Biomasse gespeicherten Kohlenstoffs führt. Eine derartige Abhängigkeit zwischen Biomassebildung und  $\text{CO}_2$ -Konzentration ist unter Treibhausbedingungen nachgewiesen worden. Ob sich die dabei erzielten Erkenntnisse auf natürliche Bedingungen übertragen lassen, ist in Anbetracht der Begrenzung des Wachstums der Biomasse durch andere Parameter, wie beispielsweise durch das Nährstoffangebot und die Verfügbarkeit von Wasser, zumindest fraglich. Eine quantitative Aussage über einen möglichen Zuwachs der Biomasse wird weiterhin dadurch erschwert, daß der Mensch in vielfältiger Weise in die terrestrischen Ökosysteme eingreift und dadurch das natürliche Gleichgewicht stört (vgl. 3. Kapitel, Nr. 3.1.1).

Der Anstieg der atmosphärischen  $\text{CO}_2$ -Konzentration wäre noch schneller, wenn das atmosphärische  $\text{CO}_2$  nicht mit dem geologischen Kohlenstoff-Kreislauf unmittelbar gekoppelt wäre. Diese Kopplung erfolgt im wesentlichen durch den Kohlenstoff-Austausch zwischen der gut durchmischten Oberflächenschicht und dem Tiefenwasser der Ozeane. Dieser Austausch wird von der vertikalen Zirkulation der Ozeane bestimmt und ist bei einer Umwälzzeit der Ozeane von etwa tausend Jahren relativ langsam. Zusätzlich wird Kohlenstoff in Form toter mariner Biomasse aus dem Oberflächenwasser in die Tiefsee überführt. Diese Biomasse wird im Oberflächenwasser durch die Photosynthese gebildet und sinkt nach dem Absterben als permanenter „Regen“ von organischen Partikeln in die darunter liegenden Wasserschichten. Durch diesen Prozess, vielfach auch als „biologische Pumpe“ bezeichnet, wird dem Oberflächenwasser laufend Kohlenstoff entzogen, der aus der Atmosphäre nachgeliefert wird (17). Die Existenz der „biologischen Pumpe“ macht deutlich, daß eine Veränderung der Netto-Primär-Produktion der marinen Biosphäre, zum Beispiel im Falle einer Zunahme der UV-B-Strahlung als Folge einer reduzierten stratosphärischen Ozonschicht, zu Veränderungen der  $\text{CO}_2$ -Austauschrate zwischen Oberflächenwasser und Tiefenwasser der Ozeane führen kann, die sich unmittelbar auf die atmosphärische  $\text{CO}_2$ -Konzentration und dadurch auf das Klima auswirken müssen.

Gäbe es keinen geochemischen Kohlenstoff-Kreislauf und würde folglich kein atmosphärisches  $\text{CO}_2$  mit dem im Tiefenwasser der Ozeane gelösten Kohlenstoff ausgetauscht, so würde sich das durch die fossile Verbrennung freigesetzte  $\text{CO}_2$  fortlaufend in der Atmosphäre akkumulieren. Bei völligem Verzicht auf den Einsatz fossiler Energie würde die  $\text{CO}_2$ -Konzentration der Atmosphäre auf dem sich dann einstellenden Gleichgewichtswert verharren. Unter diesen Bedingungen würde das atmosphärische  $\text{CO}_2$  zwar weiterhin mit den Kohlenstoff-Reservoiren im Oberflächenwasser und der marinen und terrestrischen Bio-

sphäre ausgetauscht, da sich dadurch jedoch die in diesen Reservoiren gespeicherten mittleren Kohlenstoffmengen nicht ändern, bliebe die jahreszeitlich gemittelte  $\text{CO}_2$ -Konzentration konstant.

Die atmosphärische  $\text{CO}_2$ -Konzentration kann sich nur über den Austausch mit dem Tiefenwasser der Ozeane und schließlich mit den Sedimenten des Ozeans verringern, die ein Vielfaches des atmosphärischen Kohlenstoff-Reservoirs enthalten. Das heißt aber auch, daß die zeitliche Abnahme der  $\text{CO}_2$ -Konzentration bei einem Stopp der Verbrennung von fossilen Brennstoffen mit der durch den geochemischen Kohlenstoff-Kreislauf festgelegten atmosphärischen  $\text{CO}_2$ -Verweilzeit von etwa 120 Jahren erfolgen würde. In diesem Fall würde die zum Zeitpunkt des Stopps in der Atmosphäre angetroffene  $\text{CO}_2$ -Konzentration nur langsam abnehmen und wäre nach 120 Jahren erst auf etwa ein Drittel des Ausgangswertes abgesunken.

### 1.4.3 Methan

Das troposphärische Methan ( $\text{CH}_4$ ) wird seit 1978 an verschiedenen, über beide Hemisphären verteilten Stationen systematisch gemessen (18). Die Messungen lassen einen Anstieg der mittleren troposphärischen  $\text{CH}_4$ -Konzentration, die 1990 einen global gemittelten Wert von 1,72 ppmv erreicht hat, erkennen. Die gesamte Atmosphäre enthält 4900 Millionen Tonnen Methan.

Wegen der langen Verweilzeit des  $\text{CH}_4$  in der Troposphäre von etwa acht bis zehn Jahren sind die räumlichen Unterschiede, auch zwischen den Hemisphären gering. Die höchsten troposphärischen  $\text{CH}_4$ -Konzentrationen werden mit Mittelwerten von 1,76 ppmv in der Nordhemisphäre beobachtet. Der südhemisphärische Mittelwert beträgt 1,68 ppmv. Wie beim  $\text{CO}_2$  beobachtet man auch beim  $\text{CH}_4$  einen ausgeprägten Jahresgang in der Troposphäre mit einem Maximum im Frühjahr und einem Minimum im Herbst. Der Jahresgang des troposphärischen  $\text{CH}_4$  wird bestimmt durch die zeitlichen Schwankungen seiner Quellstärken sowie der Senkenstärken. Entsprechend der Verteilung der Quellen und Senken zeigt die Amplitude der jahreszeitlichen Schwankung des troposphärischen  $\text{CH}_4$  eine Abhängigkeit von der geographischen Breite. In Abbildung 5 sind als Beispiel die an der Station Cape Point (Südafrika) gemessenen Jahresgänge des troposphärischen Methans (19) für die Jahre 1982 bis 1990 dargestellt. Neben dem langfristigen Anstieg des  $\text{CH}_4$ -Gehalts sind von Jahr zu Jahr in unterschiedlichen Stärken auftretende Fluktuationen der  $\text{CH}_4$ -Konzentrationen zu erkennen, die zeitlich variierenden Ungleichgewichte zwischen den Quellen und Senken des Methans sowie Schwankungen des Luftmassenaustausches zwischen den Hemisphären zugeschrieben werden (20). Letztere werden mit vulkanischen Ereignissen, wie beispielsweise dem Ausbruch des El Chichon, und dem El Niño-Phänomen in Verbindung gebracht (21).

Das Methan entweicht aus einer Vielzahl von Quellen an der Erdoberfläche, deren Stärken zum größten Teil nur unzureichend bekannt sind. Die wichtigsten Quellen und Senken sind in Tabelle 2 zusammengefaßt. Informationen über die globalen Produktionsra-

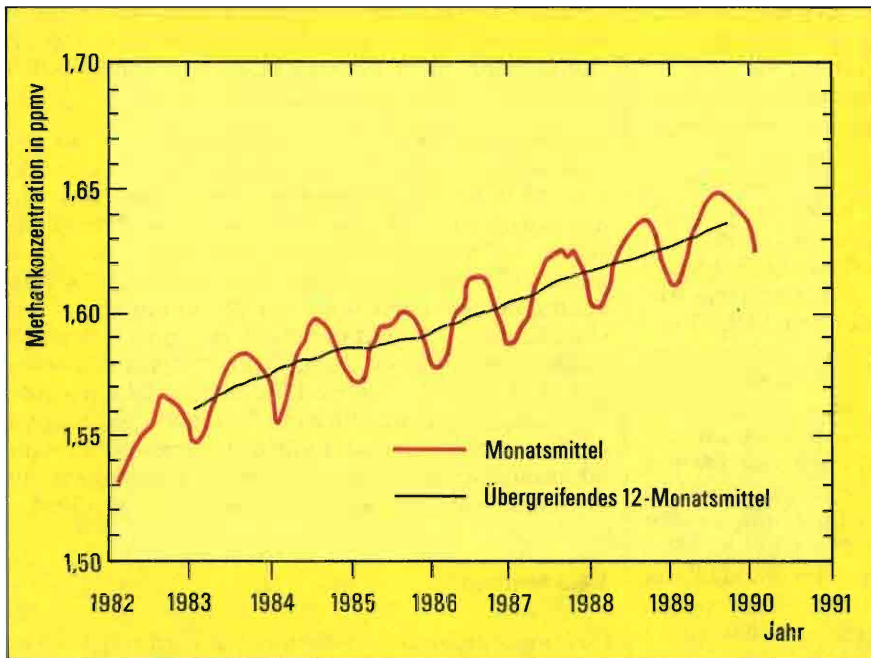


Abb. 5: Zeitlicher Verlauf der Methan-Konzentration, gemessen an der Station Cape Point, Südafrika (34°S; 18°E) (22).

ten können aus den Isotopen-Verhältnissen des in der Atmosphäre enthaltenen und des durch die einzelnen Quellen emittierten Methans gewonnen werden. Derzeitig vorliegende Ergebnisse lassen darauf schließen, daß pro Jahr 590 Millionen Tonnen Methan in die Atmosphäre abgegeben werden (23). Davon werden etwa 125 Millionen Tonnen aus fossilen Quellen freigesetzt, unter anderem unbeabsichtigt bei der Exploration von Öl und Erdgas, durch Leckage bei der Speicherung und Verteilung von Erdgas und bei der Kohleförderung. Eine quantitative Aufteilung des fossilen  $\text{CH}_4$  auf die einzelnen, zuvor genannten Quellen ist wegen des unzureichenden Datenmaterials äußerst schwierig.

Die Zusammenstellung der Quellstärken in Tabelle 2 basiert auf den zur Zeit in der Literatur verfügbaren Daten. Die großen Schwankungsbreiten der Einzelwerte sind ein Maß für die Unsicherheit der einzelnen Angaben. Es ist nicht ausgeschlossen, daß ein Teil des in der Atmosphäre angetroffenen fossilen Methans durch natürliche Quellen, unter anderem durch Emission aus natürlichen Gaslagerstätten und alten Torfbeständen sowie durch die thermische Zersetzung von  $\text{CH}_4$ -Hydraten in die Atmosphäre abgegeben wird. Demzufolge müssen die aus den Daten des Kohlenstoff-Isotops  $^{14}\text{C}$  abgeschätzten globalen Emissionsraten des fossilen  $\text{CH}_4$  in Höhe von 125 Millionen Tonnen pro Jahr nicht notwendigerweise ausschließlich auf anthropogene Prozesse zurückzuführen sein.

Die Differenz zwischen der gesamten  $\text{CH}_4$ -Emissionsrate in Höhe von 590 Millionen Tonnen und der Emission aus fossilen Quellen muß durch natürliche Prozesse in die Atmosphäre emittiert werden. Der wichtigste  $\text{CH}_4$ -Produktionsmechanismus ist der mikrobielle Abbau von organischem Material durch methanogene Bakterien unter strikt anaeroben Umweltbe-

dingungen. Biogene  $\text{CH}_4$ -Quellen, deren Emissionsraten durch menschliche Aktivitäten ansteigen, sind der Anbau von Naßreis (24), die Methan-Bildung im Pansen der Wiederkäuer (25) und die anaerobe mikrobielle Zersetzung organischer Abfälle in Mülldeponien (26). Auch die Verbrennung von Biomasse (vor allem in den Tropen) ist eine erhebliche Quelle für das troposphärische  $\text{CH}_4$  (27). Insgesamt hängen fast 50 Prozent der gesamten jährlichen Methan-Emission in die Atmosphäre mehr oder weniger direkt mit der Ernährung der wachsenden Weltbevölkerung zusammen. Es ist deshalb nicht überraschend, daß der zeitliche  $\text{CH}_4$ -Anstieg unmittelbar mit der Zunahme der Weltbevölkerung gekoppelt ist (vgl. Abbildung 6).

Eine wichtige natürliche  $\text{CH}_4$ -Quelle ist die Emission aus natürlichen Feuchtgebieten, deren Quellstärke aufgrund der heterogenen Verteilung der Quellen und ihrer Abhängigkeit von verschiedenen Standortparametern nur schwer quantitativ abgeschätzt werden kann. Neuere Angaben schwanken zwischen 50 und 200 Millionen Tonnen pro Jahr (29). Davon entfallen nach den zur Zeit vorliegenden Erkenntnissen etwa zwei Drittel auf die tropischen Feuchtgebiete und der Rest auf die Feuchtgebiete höherer Breiten.

In Permafrost-Böden und am Meeresboden der polaren Schelfgebiete ist Methan in Form von Methan-Hydraten fixiert, deren Gesamtmasse auf extrem hohe Werte von mehr als 10 000 Milliarden Tonnen  $\text{CH}_4$  geschätzt wird (30). Bei einem weltweiten Anstieg der Oberflächentemperaturen in Folge des zunehmenden Treibhauseffektes dürften aus diesem Reservoir große Mengen von  $\text{CH}_4$  in die Atmosphäre entweichen (31), die den Anstieg des atmosphärischen  $\text{CH}_4$ -Gehalts und dadurch wiederum den Treibhauseffekt verstärken können. Die Abschätzung der gegenwärtigen Emission aus dieser Quelle ist äußerst schwierig. Der in Tabelle 2 angegebene Wert von 5 Millionen Tonnen

Tabelle 2

**Quellen und Senken des Methans  
in der Troposphäre**

	Globale Flüsse in Millionen Tonnen CH <sub>4</sub> pro Jahr
<b>Natürliche Quellen</b>	
Feuchtgebiete (Moore, Sümpfe, Tundra) ..	115 ( 50–200)
Ozeane .....	10 ( 5– 20)
Seen .....	5 ( 1– 25)
Zersetzung von CH <sub>4</sub> -Hydraten	5 ( 0–100)
Termiten und andere Insekten	40 ( 10–100)
Fermentation (durch wildlebende Wiederkäuer) .....	5 ( 2– 8)
alle natürlichen Quellen .....	180 ( 68–453)
<b>Anthropogene Quellen</b>	
Reisfelder (Naßreis) .....	130 ( 70–170)
Fermentation durch Wiederkäuer (Viehhaltung) .....	75 ( 70– 80)
Verbrennung von Biomasse ..	40 ( 20– 80)
Mülldeponien .....	40 ( 20– 60)
Erdgas-Verluste bei der Gewinnung und Verteilung	30 ( 10– 50)
Kohlebergbau .....	35 ( 10– 80)
alle anthropogenen Quellen ..	350 (200–520)
unbekannte fossile Quellen ..	60
alle Quellen .....	590 (268–973)
<b>Senken</b>	
chemische Reaktion mit OH-Radikalen in der Troposphäre .....	500 (400–600)
photochemischer Abbau in der Stratosphäre .....	40 ( 30– 50)
mikrobieller Abbau in Böden (durch methanotrophe Bakterien) .....	6 ( 2– 12)
alle Senken .....	546 (432–662)
Akkumulierung in der Atmosphäre .....	44 ( 40– 48)

CH<sub>4</sub> pro Jahr ist daher bestenfalls als grober Näherungswert anzusehen.

Insgesamt summieren sich die Stärken der einzelnen Methan-Quellen zu einer jährlichen globalen Emissionsrate von 530 Millionen Tonnen, die in Anbetracht der großen Unsicherheiten der Einzelabschätzungen recht gut mit der aus den Isotopen-Verhältnissen berechneten globalen CH<sub>4</sub>-Produktionsrate von 590 Millionen Tonnen übereinstimmt.

Die Hauptsenke für das atmosphärische CH<sub>4</sub> ist seine Reaktion mit OH-Radikalen in der Troposphäre (32). Dagegen sind der Transport von Methan in die Stratosphäre (33) sowie der Abbau von Methan durch aerobe methanotrophe Bakterien in Böden (34) von untergeordneter Bedeutung. Aus der Geschwindigkeit der Reaktion des CH<sub>4</sub> mit OH-Radikalen und der beobachteten Verteilung von OH-Radikalen in der Troposphäre wird die mittlere Verweilzeit des troposphärischen Methans auf 10±2 Jahre geschätzt (35). Unter Berücksichtigung der beiden anderen Senken reduziert sich die Verweilzeit des CH<sub>4</sub> in der Troposphäre auf etwa 8 Jahre. Andere Schätzungen kommen auf knapp 9 Jahre (36).

Durch die Reaktion zwischen CH<sub>4</sub> und OH-Radikalen werden unter heutigen Bedingungen in der Troposphäre 400 bis 600 Millionen Tonnen CH<sub>4</sub> pro Jahr abgebaut. Dabei werden weitere, direkt oder indirekt klimawirksame Spurengase, wie zum Beispiel Formaldehyd (CH<sub>2</sub>O), CO, CO<sub>2</sub> und Ozon, gebildet. In der Stratosphäre trägt die Methan-Oxidation entscheidend zur Verteilung und Konzentration des Wasserdampfes bei, der einen erheblichen Einfluß auf die Chemie und das Klima der Stratosphäre hat.

#### 1.4.4 Distickstoffoxid

Das Distickstoffoxid (N<sub>2</sub>O) ist in der Troposphäre chemisch inert und wird ausschließlich in der Stratosphäre durch Photolyse beziehungsweise durch die Reaktion mit angeregtem atomarem Sauerstoff O\* abgebaut. Dabei werden molekularer Stickstoff (N<sub>2</sub>) und Stickstoffmonoxid (NO) gebildet. Dieser Prozess ist die Hauptquelle des stratosphärischen NO, das durch sein chemisches Verhalten die Verteilung und die Konzentration des stratosphärischen Ozons beeinflusst. Wegen dieses Abbauprozesses nimmt die N<sub>2</sub>O-Konzentration in der Stratosphäre mit der Höhe ab. Dagegen ist das N<sub>2</sub>O in der Troposphäre aufgrund seiner langen Verweilzeit von etwa 150 Jahren vertikal gut durchmischt. Die N<sub>2</sub>O-Konzentrationen liegen in der Nordhemisphäre etwa 1 ppbv (1 ppbv = 1 Teil auf eine Milliarde Volumenteile = 1/1000 ppmv) über den in der Südhemisphäre angetroffenen Werten.

Es treten zwar geringe von Jahr zu Jahr schwankende Konzentrationsänderungen auf, ein regelmäßiger Jahresgang läßt sich aber nicht feststellen (37). Die mittlere troposphärische N<sub>2</sub>O-Konzentration beträgt zur Zeit 310 ppbv. Dies entspricht einem atmosphärischen Reservoir von 2 350 Millionen Tonnen.

Die derzeit bekannten Quellen des troposphärischen N<sub>2</sub>O und ihre Bildungsrate sind in Tabelle 3 zusammengefaßt. N<sub>2</sub>O wird im wesentlichen durch die Aktivitäten von nitrifizierenden und denitrifizierenden Mikroorganismen in Böden (38) sowie im Meerwasser und in Wasserkörpern auf den Kontinenten (39) gebildet. Die in Tabelle 3 aufgeführten Produktionsziffern sind wegen der heterogenen Verteilung der N<sub>2</sub>O-Quellen, ihrer jahreszeitlichen Schwankungen sowie ihrer Abhängigkeit von der Temperatur und der Bodenfeuchtigkeit und den damit verbundenen kurzfristigen Schwankungen äußerst ungenau und lediglich als Näherungswerte zu betrachten. Die derzeit vorliegenden Ergebnisse deuten darauf hin, daß die Ozeane

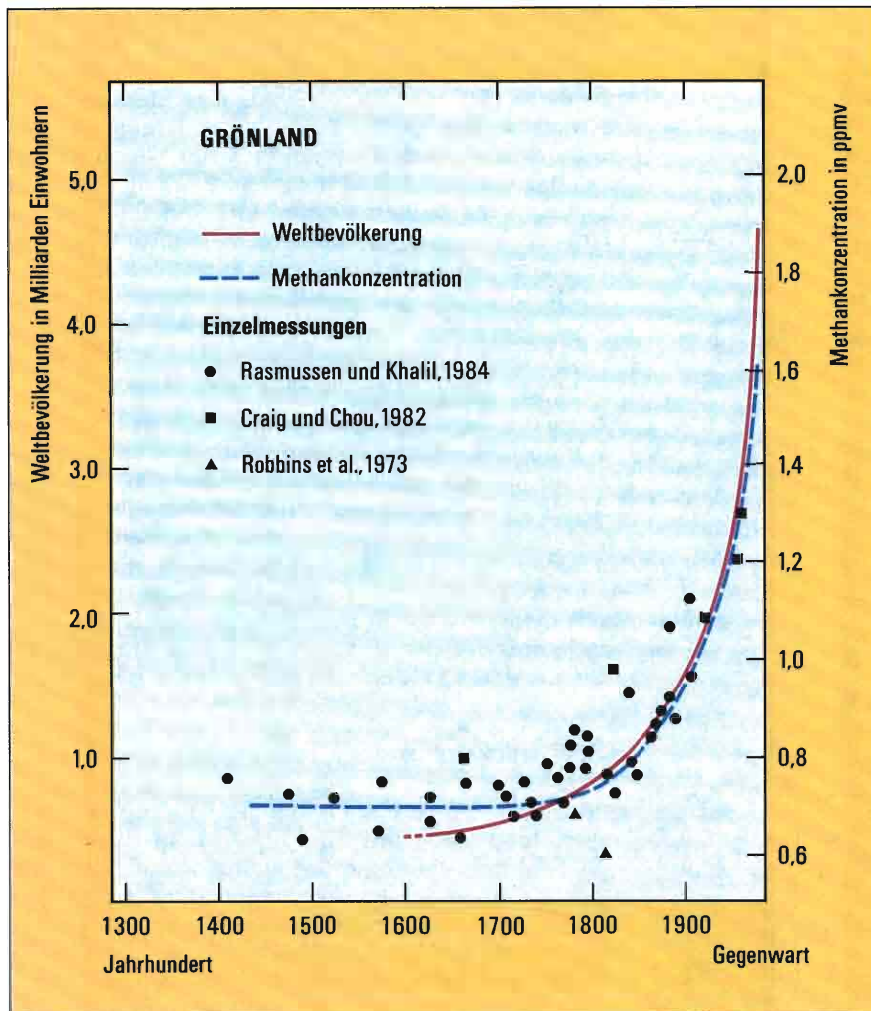


Abb. 6: Zeitlicher Trend des atmosphärischen  $\text{CH}_4$ -Gehalts (28).

global zwar eine bedeutende, aber nicht die in der Vergangenheit vielfach angenommene beherrschende Rolle im atmosphärischen  $\text{N}_2\text{O}$ -Kreislauf spielen. Von besonderer Bedeutung ist die  $\text{N}_2\text{O}$ -Emission aus den tropischen Böden, die zur Zeit als die größte bekannte  $\text{N}_2\text{O}$ -Quelle anzusehen ist (40).

$\text{N}_2\text{O}$  wird weiterhin bei der Verbrennung von fossilen Brennstoffen sowie von Biomasse gebildet und in die Atmosphäre emittiert. Bis vor wenigen Jahren wurden die Emissionsraten dieser Quellen mit 5 beziehungsweise 2,5 Millionen Tonnen  $\text{N}_2\text{O}$  angegeben (41) und allgemein als die wichtigsten  $\text{N}_2\text{O}$ -Quellen im globalen atmosphärischen  $\text{N}_2\text{O}$ -Zyklus angesehen. Inzwischen sind Zweifel an der Genauigkeit dieser Angaben aufgetreten, nachdem nachgewiesen werden konnte, daß die  $\text{N}_2\text{O}$ -Konzentration in Luftproben, die aus Verbrennungsabgasen von Kraftwerken entnommen und in Stahlbehältern gelagert worden waren, mit der Zeit zunehmen und dadurch die bisherigen  $\text{N}_2\text{O}$ -Emissionsraten aus der Verbrennung fossiler Brennstoffe um den Faktor 10 überschätzt worden sind (42). Ein wesentlicher Bildungsprozess für  $\text{N}_2\text{O}$  in diesen Luftproben ist die Reduktion von  $\text{NO}$  an der

Oberfläche der Stahlbehälter in Anwesenheit hoher Wasserdampf- und  $\text{SO}_2$ -Konzentrationen.

Ob dieser Prozeß auch in Luftproben stattfindet, die in Abgasfahnen von Biomasse-Verbrennungen genommen worden sind, ist nicht sicher. In diesen Proben werden sicherlich ähnlich hohe  $\text{NO}_x$ -Werte wie in den Rauchgasen von konventionellen Kraftwerken angetroffen. Allerdings liegen die  $\text{SO}_2$ -Werte in diesen Luftproben wegen des verhältnismäßig geringen Schwefelgehalts der Biomasse erheblich unter den Abgasen aus der fossilen Verbrennung. Es besteht deshalb durchaus die Möglichkeit, daß die bisher für die Biomasse-Verbrennung angegebenen  $\text{N}_2\text{O}$ -Emissionsraten nicht oder in einem geringeren Umfang als im Falle der Verbrennung fossiler Brennstoffe reduziert werden müssen. In Tabelle 3 sind deshalb die korrigierten Werte als Untergrenze und die bisher publizierten Werte als Obergrenze der  $\text{N}_2\text{O}$ -Emission aus der Biomasse-Verbrennung angegeben.

Die einzige bekannte Senke für  $\text{N}_2\text{O}$  ist der bereits erwähnte photochemische Abbau in der Stratosphäre; ihre Stärke ist mit etwa 20 Millionen Tonnen pro Jahr relativ gut bekannt (43). Es ist nicht ausgeschlossen,

Tabelle 3

**Quellen und Senken des Distickstoffoxids (N<sub>2</sub>O)**

	Globale Flüsse in Millionen Tonnen N <sub>2</sub> O pro Jahr
<b>Natürliche Quellen</b>	
Ozeane/Seen . . . . .	2,0 – 4,0
Natürliche Böden . . . . .	4,6 – 8,2
alle natürlichen Quellen . . . . .	6,6 – 12,2
<b>Anthropogene Quellen</b>	
Verbrennung fossiler Brennstoffe . . . . .	0,2 – 0,5
Verbrennung von Biomasse . . . . .	0,2 – 2,4
Einsatz von künstlichen Düngern (Böden und Grundwasser) . . . . .	1,0 – 3,6
Alle anthropogenen Quellen . . . . .	1,4 – 6,5
Alle Quellen <sup>1)</sup> . . . . .	8,0 – 18,7
<b>Senken</b>	
Photochemischer Abbau in der Stratosphäre . . . . .	etwa bis 20,5
Aufnahme durch Böden und/oder aquatische Mikroorganismen . . . . .	unbekannt
Akkumulierung in der Troposphäre . . . . .	4,7 – 7,1

<sup>1)</sup> Weitere mögliche Quellen sind: Photochemische Reaktionen in der Stratosphäre und Troposphäre sowie die Bildung von N<sub>2</sub>O durch Einsatz von Katalysatoren.

daß N<sub>2</sub>O auch in einem geringen Umfang durch mikrobiologische Aktivitäten in Böden abgebaut werden kann.

Aus der beobachteten jährlichen Zunahme des troposphärischen N<sub>2</sub>O wurde die Gesamtquellstärke des atmosphärischen N<sub>2</sub>O mit 19 bis 30 Millionen Tonnen pro Jahr abgeschätzt (44). Die Gesamtemission aller bisher nachgewiesenen Quellen beträgt jedoch nur 8 bis 17 Millionen Tonnen pro Jahr. Diese Differenz läßt vermuten, daß entweder noch nicht alle N<sub>2</sub>O-Quellen bekannt sind oder die Stärke verschiedener bekannter Quellen bisher unterschätzt worden ist.

Eine mögliche derartige Quelle, die bisher unberücksichtigt geblieben ist, ist die photochemische Bildung von N<sub>2</sub>O (45). Die Stärke dieser Quelle wurde auf 6 Millionen Tonnen N<sub>2</sub>O pro Jahr geschätzt (46). Von dieser als Obergrenze anzusehenden Produktionsrate entfallen mehr als 90 Prozent auf die Stratosphäre und weniger als 10 Prozent auf die Troposphäre.

Weiterhin gibt es experimentelle Hinweise darauf, daß N<sub>2</sub>O durch den Einsatz von Katalysatoren im Automobil- und Kraftwerksbereich gebildet und in die Atmosphäre emittiert wird. Durch Vergleichsmessun-

gen konnte nachgewiesen werden, daß der Einsatz von Katalysatoren zu einem zehnfach höheren N<sub>2</sub>O-Ausstoß durch Kraftfahrzeuge führt (47) und damit eine nicht vernachlässigbare N<sub>2</sub>O-Quelle darstellen kann. Systematische Untersuchungen, unter anderem auch im Kraftwerksbereich, fehlen oder sind nicht bekannt, so daß eine Abschätzung der globalen N<sub>2</sub>O-Emission durch die zunehmende Verwendung von Katalysatoren zur Zeit nicht möglich ist.

**1.4.5 Halogenierte Kohlenwasserstoffe**

Die halogenierten Kohlenwasserstoffe gehören zu den klimarelevanten Spurengasen mit dem höchsten Treibhauspotential. Darüber hinaus tragen sie zum Abbau der stratosphärischen Ozonschicht bei. Den halogenierten Kohlenwasserstoffen ist deshalb besondere Aufmerksamkeit zu widmen. Auf die Quellen und Senken sowie die Effekte ansteigender Konzentration der halogenierten Kohlenwasserstoffe wird in Abschnitt D dieses Berichts detailliert eingegangen. Es werden deshalb nachstehend die wichtigsten Fakten nur kurz dargestellt.

Die meisten der in der Atmosphäre vorhandenen halogenierten Verbindungen sind synthetisch, das heißt, es gibt keine natürlichen Quellen. Generell wird zwischen den vollhalogenierten und den teilhalogenierten Verbindungen unterschieden. Während die vollhalogenierten Verbindungen in der Troposphäre chemisch inert sind und erst in der Stratosphäre photolytisch gespalten werden, können die teilhalogenierten Verbindungen zu einem erheblichen Teil bereits in der Troposphäre photochemisch abgebaut werden.

Neben Tetrachlorkohlenstoff sind die Fluorchlorkohlenwasserstoffe FCKW 11 (CFCl<sub>3</sub>), FCKW 12 (CF<sub>2</sub>Cl<sub>2</sub>), FCKW 113 (CFCl<sub>2</sub>-CF<sub>2</sub>Cl) und FCKW 114 (CF<sub>2</sub>Cl-CF<sub>2</sub>Cl) die wichtigsten vollhalogenierten Kohlenwasserstoffe. Wegen ihres großen Ozonzerstörungspotentials sind auch verschiedene bromhaltige Verbindungen, die als Feuerlöschmittel (vor allem die Halone 1211 (CF<sub>2</sub>ClBr) und 1301 (CF<sub>3</sub>Br)) Verwendung finden, von Interesse.

Die FCKW werden hauptsächlich als Blähmittel bei der Herstellung von Kunststoffschäumen (FCKW 11 und 12), als Aerosoltreibgase (FCKW 11, 12 und 114), als Kältemittel (FCKW 12 und 114) und als Reinigungsmittel in der Elektronik-Branche (FCKW 113) eingesetzt. Tetrachlorkohlenstoff wird heute vor allem als Lösungsmittel und als Zwischenprodukt für die Herstellung von FCKW 11 und 12 verwendet.

Zu den wichtigsten teilhalogenierten Kohlenwasserstoffen zählen Methylchlorid (CH<sub>3</sub>Cl), Methylbromid (CH<sub>3</sub>Br) und Methylchloroform (CH<sub>3</sub>CCl<sub>3</sub>) sowie das ein Wasserstoffatom enthaltende H-FCKW 22 (CHF<sub>2</sub>Cl). Methylchlorid ist ein industrielles Zwischenprodukt für die Synthese von FCKW 11 und 12 sowie H-FCKW 22. Methylchlorid und Methylbromid werden im Ozean auch durch natürliche Prozesse gebildet und in die Atmosphäre abgegeben. Zusätzlich wird CH<sub>3</sub>Cl auch bei der Verbrennung von Biomasse gebildet (48).

Methylchloroform wird hauptsächlich als Entfettungsmittel in der Metallindustrie und als Lösungsmittel für

Farben, Lacke und Klebstoffe verwendet. Wegen seiner geringen Toxizität und schlechten Entflammbarkeit hat das  $\text{CH}_3\text{CCl}_3$  andere Reinigungsmittel, wie zum Beispiel  $\text{C}_2\text{Cl}_4$  oder  $\text{C}_2\text{HCl}_3$ , weitgehend ersetzt. Das H-FCKW 22 findet vor allem als Kältemittel Verwendung.

Die einzige Senke für die in die Atmosphäre emittierten vollhalogenierten Kohlenwasserstoffe ist die Photodissoziation in der Stratosphäre. Dementsprechend haben diese Verbindungen sehr lange Verweilzeiten in der Atmosphäre. Die teilhalogenierten Spezies werden dagegen schon zu einem erheblichen Teil in der Troposphäre durch Reaktion mit OH-Radikalen abgebaut, so daß ihre atmosphärischen Verweilzeiten erheblich kürzer als die der vollhalogenierten Verbindungen sind.

Die mittleren globalen Konzentrationen der halogenierten Kohlenwasserstoffe in der Troposphäre liegen im pptv-Bereich (1 pptv = 1 Teil auf eine Billion Volumenteile). Infolge ihrer langen Verweilzeiten sind die räumlichen Konzentrationsunterschiede in der globalen Troposphäre gering. In der Nordhemisphäre liegen die troposphärischen Konzentrationen der vollhalogenierten Spezies geringfügig über den entsprechenden Werten in der Südhemisphäre. Diese Differenz ist darauf zurückzuführen, daß mehr als 90 Prozent der globalen Emission in den Industrie-Nationen auf der Nordhemisphäre erfolgt.

#### 1.4.6 Ozon in der Troposphäre

Unter den klimarelevanten atmosphärischen Spurengasen nimmt das Ozon eine Sonderstellung ein. Es wird nicht durch natürliche oder anthropogene Quellen in die Atmosphäre emittiert, sondern durch photochemische Prozesse in der Atmosphäre gebildet. Dabei sind die Produktionsprozesse in der Stratosphäre und der Troposphäre verschieden. Das atmosphärische Ozon hat im Gegensatz zu den anderen klimarelevanten Spurengasen eine sehr kurze Verweilzeit in der Atmosphäre. Eine weitere Besonderheit des Ozons ist die Beobachtung, daß seine Konzentration in der Troposphäre, vor allem in der Nordhemisphäre, allgemein ansteigt, in der Stratosphäre jedoch seit einer Reihe von Jahren weltweit abnimmt.

Die Konzentration und die Verteilung des Ozons in der Stratosphäre werden durch dynamische und photochemische Prozesse sowie durch Strahlungsprozesse bestimmt, die in Abschnitt D, 1. Kapitel, näher beschrieben sind. Das Ozon in der Troposphäre ist aus drei Gründen von besonderem Interesse: einmal ist Ozon äußerst klimawirksam und trägt merklich zum Treibhauseffekt der Atmosphäre bei, zum anderen ist das Ozon in der Troposphäre der wichtigste Vorläufer der OH-Radikale, die einen bedeutenden Einfluß auf die Chemie der Troposphäre haben und die Konzentration und Verteilung verschiedener troposphärischer Spurengase, unter anderem auch des Methans, maßgeblich beeinflussen. Zusätzlich wirkt das Ozon in hohen Konzentrationen toxisch auf Fauna und Flora. Es ist wahrscheinlich, daß das Ozon zusammen mit anderen Photooxidantien einen Beitrag zu den in Europa und USA beobachteten „Neuartigen Waldschäden“ leistet.

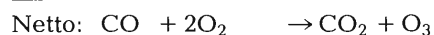
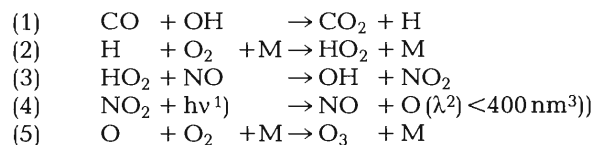
Die  $\text{O}_3$ -Konzentrationen zeigen starke regionale Unterschiede und variieren mit der geographischen Länge und Breite. Darüberhinaus zeigen sie eine starke Abhängigkeit von der Höhe und der Jahreszeit (49). In reinen Luftmassen der mittleren Breiten der Nordhemisphäre schwanken die  $\text{O}_3$ -Konzentrationen zwischen 30 und 50 ppbv. Deutliche Maxima treten regelmäßig im Frühling und Sommer auf. In verschmutzten Luftmassen können bei „Smog“-Ereignissen Werte von deutlich über 100 ppbv erreicht werden, die in dieser Größenordnung toxisch auf Mensch, Tier und Pflanze wirken.

In den Tropen sind die  $\text{O}_3$ -Konzentrationen im allgemeinen niedriger als in mittleren Breiten der Nordhemisphäre (50). Dies gilt nicht für die Trockenzeit, wenn durch die Biomasse-Verbrennung Vorläufersubstanzen für die photochemische Ozon-Bildung in erheblichem Umfang emittiert werden. In den davon beeinflussten Gebieten können die  $\text{O}_3$ -Konzentrationen in dieser Jahreszeit Werte erreichen, die den über den Industriegebieten der mittleren Breiten im Sommer beobachteten  $\text{O}_3$ -Konzentrationen entsprechen (51). Dagegen kann die  $\text{O}_3$ -Konzentration in sauberen kontinentalen und maritimen Luftmassen der Tropen auf Werte von 4 bis 12 ppbv absinken (52).

Eine wesentliche Quelle für Ozon in der Troposphäre ist der vertikale Transport aus der Stratosphäre, der starke regionale Unterschiede aufweist. Dieser vertikale Transport ist vornehmlich auf die mittleren Breiten beschränkt und tritt vor allem im Frühjahr auf. Der gesamte über das Jahr gemittelte Transport von Ozon aus der Stratosphäre in die Troposphäre wird auf 720 bis 1 220 Millionen Tonnen pro Jahr geschätzt (53). Aufgrund unterschiedlicher meteorologischer Verhältnisse ist der Fluß stratosphärischen Ozons in die Troposphäre in der Nordhemisphäre etwa doppelt so groß wie in der Südhemisphäre.

Ozon wird auch in einem erheblichen Umfang in der Troposphäre bei der durch die Stickoxide  $\text{NO}$  und  $\text{NO}_2$  katalysierten photochemischen Oxidation von  $\text{CO}$ ,  $\text{CH}_4$  und höheren Kohlenwasserstoffen gebildet (54). Dabei ist die Ozon-Produktionsrate in nicht-linearer Weise von den Konzentrationen der genannten Spurengase, aber auch von den Verhältnissen der Konzentrationen der einzelnen Gase untereinander abhängig. Von besonderer Bedeutung ist das Verhältnis der  $\text{O}_3$ - und  $\text{NO}_x$ -Konzentration.

Die Komplexität der photochemischen Bildung und des Abbaus von Ozon in der Troposphäre wird nachstehend am Beispiel der noch relativ einfachen Oxidationszyklen des troposphärischen Kohlenmonoxids verdeutlicht:



1)  $h\nu$  = Strahlungsenergie, wobei  $h$  das Planck'sche Wirkungsquantum ist und  $\nu$  die Frequenz der Strahlung

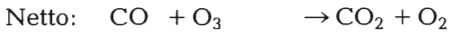
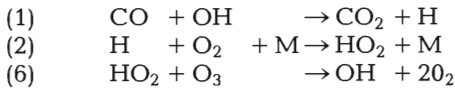
2)  $\lambda$  = Wellenlänge der Strahlung

3)  $1 \text{ nm} = 10^{-9} \text{ m} = 10^{-3} \mu\text{m}$

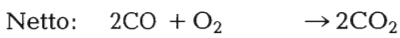
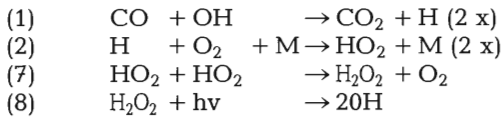


In Anwesenheit von ausreichend hohen NO-Konzentrationen (mindestens 10 pptv) wird in diesem Fall für jedes in der Troposphäre abgebaute CO-Molekül ein O<sub>3</sub>-Molekül gebildet.

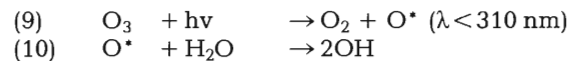
Ist die NO-Konzentration relativ zur O<sub>3</sub>-Konzentration kleiner als 1 : 4 000 (das heißt kleiner als 10 pptv), gewinnen die Konkurrenzreaktionen zu (3) an Bedeutung, wobei dann der Reaktionsverlauf nach



erfolgt. In dieser Reaktionskette wird Ozon nicht mehr produziert, sondern abgebaut. Eine weitere Möglichkeit ist die nachstehend aufgeführte Reaktionskette:



In dieser Reaktionskette wird CO ohne Beeinflussung des troposphärischen O<sub>3</sub>-Gehalts zu CO<sub>2</sub> oxidiert. Dies gilt nicht mehr, wenn H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> – das gut wasserlöslich ist – durch Regen aus der Atmosphäre ausgewaschen beziehungsweise durch Reaktionen an Oberflächen abgebaut wird. In diesem Fall gehen dem Reaktionszyklus Radikale verloren, die über die Photolyse des Ozons



nachgebildet werden und damit zu einem Verlust an troposphärischem Ozon führen.

Gegenüber der CO-Oxidation erfolgt der photochemische Abbau des Methans und der Nicht-Methan-Kohlenwasserstoffe nach einer erheblich komplizierteren Reaktionskette, die für den Fall der Nicht-Methan-Kohlenwasserstoffe noch weitgehend unerforscht ist. Ähnlich wie bei der Oxidation des CO wird beim photochemischen Abbau des CH<sub>4</sub> und der Nicht-Methan-Kohlenwasserstoffe bei Anwesenheit ausreichend hoher NO-Konzentrationen Ozon gebildet. Das Potential der O<sub>3</sub>-Produktion durch photochemische Prozesse in der Troposphäre wird auf 8 000 Millionen Tonnen O<sub>3</sub> pro Jahr geschätzt (55). Dieser Wert übersteigt den Fluß von O<sub>3</sub> aus der Stratosphäre um etwa den Faktor 10. In der Realität liegt die NO-Konzentration in großen Gebieten der Erdatmosphäre, insbesondere über den Ozeanen und über weiten Teilen der Südhemisphäre, unterhalb des kritischen, für die O<sub>3</sub>-Produktion notwendigen Wertes, so daß ein nicht unerheblicher Teil des CO, CH<sub>4</sub> und der Nicht-Methan-Kohlenwasserstoffe unter Bedingungen oxidiert wird, die eher zu einem Abbau als zu einer Produktion von Ozon führen.

Wegen der unzureichenden Daten über die Verteilung der Stickoxide und Nicht-Methan-Kohlenwasserstoffe und ihre zeitlichen Variationen ist eine quantitative Abschätzung des durch den photochemischen Abbau von CO, CH<sub>4</sub> und Nicht-Methan-Kohlenwasserstoffen in der Troposphäre gebildeten Ozons kaum

möglich. Hinweise auf die photochemischen Ozon-Produktionsraten geben Massenbilanzbetrachtungen des troposphärischen O<sub>3</sub>. Basierend auf Abschätzungen des Transports und des Abbaus von Ozon in der Troposphäre wird die Netto-Produktion des photochemisch gebildeten Ozons auf 3000 Millionen Tonnen O<sub>3</sub> pro Jahr geschätzt (56). Diese Angabe ist mit erheblichen Unsicherheiten behaftet, zeigt aber doch recht deutlich, daß der Gehalt und die Verteilung von Ozon in der Troposphäre in einem erheblichen Umfang durch photochemische Reaktionen in der Troposphäre bestimmt werden. Zunehmende Emissionsraten von NO, CO, CH<sub>4</sub> und Nicht-Methan-Kohlenwasserstoffen können deshalb zu einer Erhöhung der O<sub>3</sub>-

Tabelle 4

**Quellen und Senken des Ozons in der Troposphäre (60)**

Es werden Schätzwerte für die Jahre 1880 und 1980 angegeben.

	Globale Flüsse in Millionen Tonnen Ozon pro Jahr	
	1880	1980
<b>Quellen</b>		
Vertikaler Transport aus der Stratosphäre .....	1 220	1 220
Oxidation von CO, CH <sub>4</sub> und NMKW <sup>1)</sup> in der Troposphäre:		
a) Oxidation von NO durch HO <sub>2</sub> .....	1 550	3 360
b) Oxidation von NO durch CH <sub>3</sub> O <sub>2</sub> .....	550	1 200
c) Oxidation von NO durch RO <sub>2</sub> .....	340	570
alle Quellen .....	3 660	6 350
<b>Senken</b>		
Trockene Deposition an der Erdoberfläche .....	740	1 420
Chemische Reaktionen in der Troposphäre:		
a) Bildung von OH-Radikalen	1 440	2 260
b) Verlust von O* .....	25	25
c) Reaktion von O <sub>3</sub> mit NO ..	50	140
d) Reaktion von O <sub>3</sub> mit NO <sub>2</sub> (nachts) .....	5	30
e) Reaktion von O <sub>3</sub> mit Olefinen <sup>2)</sup> .....	150	175
f) Reaktion von O <sub>3</sub> mit HO <sub>2</sub> und OH .....	1 250	2 300
alle Senken .....	3 660	6 350

1) NMKW = Nichtmethan-Kohlenwasserstoffe;

2) Olefine = ungesättigte Aliphaten, Isopren und Terpene

Konzentrationen und dadurch zu einer Veränderung des Oxidationspotentials der Troposphäre führen (57).

Dieser photochemischen Netto-Produktion steht ein Abbau des troposphärischen Ozons durch die Photolyse von O<sub>3</sub> bei Wellenlängen unterhalb von 310 nm gegenüber (vgl. Gleichungen 9 und 10), der auf 1 600 Millionen Tonnen pro Jahr geschätzt worden ist (58) und wegen der ansteigenden O<sub>3</sub>-Konzentrationen in der Troposphäre zunimmt. Ein weiterer wichtiger Abbauprozess des troposphärischen Ozons ist die trockene Deposition an Oberflächen jeglicher Art, inklusive Oberflächen von Pflanzen. Dieser Abbauprozess war in der Vergangenheit lange Zeit als der einzige Abbauprozess von troposphärischem Ozon angesehen worden. Aus Ergebnissen von wiederholt durchgeführten Messungen der trockenen Deposition von O<sub>3</sub> läßt sich eine globale Verlustrate von troposphärischem O<sub>3</sub> in Höhe von 2 000 bis 3 000 Millionen Tonnen pro Jahr errechnen (59). In Tabelle 4 sind die Produktions- und Abbauraten zusammengefaßt und Vergleiche zwischen den Jahren 1880 und 1980 angestellt. Für die Einzelwerte sind zwar keine Schwankungsbreiten angegeben; es muß aber darauf hingewiesen werden, daß diese Angaben noch relativ unsicher sind.

#### 1.4.7 Indirekt klimawirksame Gase

Neben den direkt klimarelevanten Substanzen wie CO<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub>, N<sub>2</sub>O, den verschiedenen halogenierten Kohlenwasserstoffen und dem Ozon gibt es noch eine Reihe von anderen atmosphärischen Spurengasen, die indirekt klimawirksam sind, weil sie unter anderem zur Ozonbildung in der Troposphäre beitragen. Zu diesen Spurengasen gehören das CO, die Stickstoffoxide NO und NO<sub>2</sub> sowie die umfangreiche Gruppe der flüchtigen organischen Verbindungen (VOC).

##### – Kohlenmonoxid

Unter den genannten indirekt klimawirksamen atmosphärischen Spurengasen ist das Kohlenmonoxid das in der Troposphäre am häufigsten vorkommende Gas. Wegen seiner kurzen troposphärischen Verweilzeit von ein bis drei Monaten variiert die Konzentration von CO in der Troposphäre räumlich und zeitlich erheblich. Trotz zahlreicher Messungen (61) sind die globale CO-Verteilung und die langfristigen Trends nur mit unzureichender Genauigkeit dokumentiert.

Die CO-Konzentration in der Troposphäre ist im Frühjahr am größten und im Herbst am geringsten. Die CO-Werte schwanken in der Nordhemisphäre zwischen etwa 100 und 150 ppbv, in der Südhemisphäre dagegen nur zwischen 40 und 80 ppbv (62). In Großstädten und industriellen Ballungsgebieten treten kurzzeitig wesentlich höhere Konzentrationen von mehr als 1 bis 10 ppmv auf. In der Stratosphäre und in der Troposphäre über dicht besiedelten Gebieten nimmt die CO-Konzentration schnell mit der Höhe ab. In den Reinluftgebieten der Nordhemisphäre wird eine geringere Abnahme des troposphärischen CO

mit der Höhe beobachtet. In der Südhemisphäre scheint das CO vertikal gut durchmischt zu sein. Lediglich im tropischen Bereich der Südhemisphäre treten vertikale Gradienten auf, wobei wegen des weiträumigen Transports aus der CO-reicheren Nordhe-

Tabelle 5

#### Quellen und Senken des Kohlenmonoxids (CO) in der Troposphäre

	Globale Flüsse in Millionen Tonnen CO pro Jahr
<b>Natürliche Quellen</b>	
Pflanzen und Mikroorganismen auf den Kontinenten . . . . .	100 ( 50– 200)
Ozeane . . . . .	40 ( 20– 80)
Waldbrände . . . . .	30 ( 10– 50)
photochemische Oxidation von natürlichem CH <sub>4</sub> in der Troposphäre . . . . .	250 ( 200– 300)
photochemische Oxidation von natürlichen VOC *) in der Troposphäre . . . . .	500 ( 200–1200)
alle natürlichen Quellen . . . . .	920 ( 480–1830)
<b>Anthropogene Quellen</b>	
Verbrennung fossiler Brennstoffe . . . . .	500 ( 400–1000)
Brandrodung tropischer Wälder . . . . .	400 ( 200– 800)
Savannenbrände und landwirtschaftliche Verbrennung von Biomasse in den Tropen . . . . .	200 ( 100– 400)
Verbrennung von Holz zur Energiegewinnung . . . . .	50 ( 25– 150)
photochemische Oxidation von anthropogenem CH <sub>4</sub> in der Troposphäre . . . . .	250 ( 200– 300)
photochemische Oxidation von anthropogenen VOC *) in der Troposphäre . . . . .	90 ( 60– 120)
alle anthropogenen Quellen . . . . .	1490 ( 985–2770)
alle Quellen . . . . .	2410 (1465–4600)
<b>Senken</b>	
Reaktion mit OH-Radikalen in der Troposphäre . . . . .	2050 (1350–2750)
Aufnahme durch Böden . . . . .	250 ( 150– 450)
photochemischer Abbau in der Stratosphäre . . . . .	107 ( 80– 130)
alle Senken . . . . .	2407 (1580–3330)
Akkumulierung in der Troposphäre . . . . .	3 ( 0– 6)

\*) VOC = flüchtige organische Verbindungen

misphäre in der oberen Troposphäre zeitweise sogar eine höhere CO-Konzentration auftreten kann als in Bodennähe. Aufgrund der jahreszeitlichen CO-Schwankungen ist der Unterschied der mittleren troposphärischen CO-Konzentration zwischen Nord- und Südhemisphäre besonders im April groß. Im Herbst ist dieser Unterschied hingegen kaum erkennbar (63).

Das CO in der Troposphäre wird durch eine Reihe unterschiedlicher Quellen an der Erdoberfläche, aber auch in der Troposphäre gebildet. Etwa die Hälfte der globalen CO-Produktion erfolgt an der Erdoberfläche. Die Emissionsraten der einzelnen Quellen sind nur unzureichend bekannt. Die in Tabelle 5 angegebenen Emissionswerte zeigen dementsprechend große Bandbreiten. Kohlenmonoxid wird durch mikrobielle Prozesse in Böden und im Meerwasser sowie durch Aktivitäten höherer Pflanzen (64) gebildet und entsteht bei der Verbrennung fossiler Brennstoffe (65), bei der Verbrennung von Biomasse (66) sowie bei der photochemischen Oxidation von Methan und VOC in der Troposphäre (67). Etwa 60 Prozent der insgesamt auf 2 400 Millionen Tonnen geschätzten CO-Produktion stammen aus menschlichen Quellen, im wesentlichen der Emission von CO durch Verbrennungsmaschinen, unter anderem in Automobilen.

Der wichtigste Abbauprozess von CO ist die Reaktion mit OH-Radikalen in der Troposphäre, die für einen CO-Abbau in Höhe von 2 100 Millionen Tonnen pro Jahr verantwortlich ist. Auf diese Senke wiesen bereits in den siebziger Jahren durch McConnell (68) und Wofsy u. a. (69) hin, und Crutzen und Gidel (70) schätzten die Abbauraten quantitativ ab. Zusätzlich wird CO auch durch mikrobielle Prozesse in Böden abgebaut (71). In geringem Umfang wird CO auch in die Stratosphäre transportiert, wo es durch photochemische Reaktionen oxidiert wird.

### – Stickoxide

Die Stickstoffoxide NO und NO<sub>2</sub> sind sehr reaktive Verbindungen. Da sich in der Atmosphäre sehr schnell ein photochemisches Gleichgewicht zwischen NO und NO<sub>2</sub> über die Reaktion von NO mit Ozon einerseits und die Photolyse des NO<sub>2</sub> andererseits einstellt, werden die beiden Spezies immer zusammen als NO<sub>x</sub> betrachtet. Die Verweilzeit von NO<sub>x</sub> in der Atmosphäre ist sehr kurz. In der Troposphäre beträgt sie nur etwa einen Tag. Wegen dieser kurzen Verweilzeit und der komplexen Verteilung der Quellen variiert das NO<sub>x</sub> in der Troposphäre sowohl zeitlich wie räumlich sehr stark (72).

In bodennahen Luftmassen und in der freien Troposphäre schwanken die NO<sub>x</sub>-Konzentrationen in Abhängigkeit von der Entfernung von den Quell-Regionen um einige Größenordnungen. So schwankt die NO<sub>x</sub>-Konzentration in bodennahen Luftmassen zwischen 1 pptv in extrem reiner maritimer Luft und bis 10 ppbv in verschmutzter Luft (zum Beispiel über Europa und dem östlichen Nordamerika). In der freien Troposphäre werden NO<sub>x</sub>-Konzentrationen von weniger als 20 pptv in Reinfluft bis mehr als 5 ppbv über den dicht besiedelten Gebieten der stark industrialisierten Länder beobachtet (73). In Großstädten mißt man häu-

fig Werte von mehr als 10 ppbv, kurzzeitig sogar mehr als 100 ppbv (74).

In der Stratosphäre wird NO durch photochemische Reaktionen zwischen N<sub>2</sub>O und angeregten Sauerstoff-Atomen (O\*) gebildet. Dies führt über einen in Abschnitt D näher beschriebenen katalytischen Reaktionszyklus zu einem Abbau des Ozons in der Stratosphäre. Infolge dieser Wechselbeziehung trägt die Verwendung mineralischer Dünger in der Landwirtschaft zur Zerstörung der stratosphärischen Ozonschicht bei. Dieses Beispiel dokumentiert in anschaulicher Weise die enge Kopplung der Kreisläufe verschiedener Spurengase.

Das troposphärische NO<sub>x</sub> wird durch verschiedene Quellen an der Erdoberfläche produziert und nahezu ausschließlich in Form von NO emittiert. Die Emissionsraten der einzelnen Quellen und der Stickoxid-Haushalt der Troposphäre sind in der Vergangenheit wiederholt abgeschätzt worden (75). Trotzdem sind die in der Literatur angegebenen Emissionsraten wegen der heterogenen Verteilung der Quellen und ihrer komplexen Abhängigkeit von einer Vielzahl unterschiedlicher Standortparameter noch mit großen Unsicherheiten verbunden und vielfach nur als Näherungswerte zu betrachten. Mit Hilfe der zur Zeit vorliegenden Daten wird die globale NO<sub>x</sub>-Emission auf etwa 50 Millionen Tonnen Stickstoff (N) pro Jahr geschätzt. Davon stammen etwa 29 Millionen Tonnen N oder 60 Prozent aus anthropogenen Quellen. Der Rest verteilt sich auf mehrere natürliche Quellen. Die bisher bekannten Quellen mit ihren Emissionsraten sind in Tabelle 6 zusammengefaßt.

Die wichtigste Quelle im troposphärischen NO<sub>x</sub>-Haushalt ist die Verbrennung fossiler Brennstoffe, durch die insgesamt etwa 20 Millionen Tonnen N pro Jahr in die Atmosphäre emittiert werden. Den größten Beitrag innerhalb dieser Quelle liefert die Verbrennung von Kohle, Öl und Gas zur Energiegewinnung (etwa 11 Millionen Tonnen N pro Jahr). Etwas weniger, nämlich 9 Millionen Tonnen N, werden durch Automobile und Flugzeuge produziert (77). Umfangreiche NO-Mengen werden auch bei der Verbrennung von Biomasse, unter anderem bei Savannenbränden, bei der Rodung tropischer Wälder und bei der Nutzung von Brennholz, freigesetzt, die insgesamt auf 5 bis 10 Millionen Tonnen N abgeschätzt werden (78). NO wird auch aus mineralischem Dünger durch mikrobiologische Prozesse in Böden gebildet und mit einer Rate von 1 bis 2 Millionen Tonnen pro Jahr in die Atmosphäre abgegeben (79). Die gleiche Menge kann auch durch die mikrobiologische Umwandlung von Harnstoff freigesetzt werden, der bei der Tierhaltung in zunehmendem Umfang anfällt und oft als Gülle auf die Felder aufgebracht wird (80).

Die wichtigste natürliche Quelle für NO<sub>x</sub> in der Troposphäre ist die Nitrifikation und Denitrifikation durch Mikroorganismen in Böden, bei denen Ammonium beziehungsweise Nitrat in N<sub>2</sub>O und zu einem signifikanten Anteil auch in NO beziehungsweise NO<sub>2</sub> überführt und in die Atmosphäre emittiert wird. Die Emission aus Böden ist von einer Vielzahl von Parametern abhängig; Zahlenangaben zeigen dementsprechend extrem große Schwankungsbreiten. Abschätzungen der globalen NO<sub>x</sub>-Emission aus na-

Tabelle 6

**Quellen der Stickoxide in der Troposphäre  
(Summe NO und NO<sub>2</sub>) (76).**

	Globe Flüsse in Millionen Tonnen Stickstoff pro Jahr
<b>Natürliche Quellen</b>	
Transport aus der Stratosphäre .....	1 ± 0,5
elektrische Entladungen in der Troposphäre .....	5 ± 3
natürliche Böden .....	10 ± 5
Photooxidation von NH <sub>3</sub> in der Troposphäre .....	3 ± 2
alle natürlichen Quellen .....	19 ± 10,5
<b>Anthropogene Quellen</b>	
Verbrennung fossiler Brennstoffe .....	20 ± 7
Verbrennung von Biomasse ..	7 ± 3
künstliche Düngung – mineralischer Dünger .....	2 ± 1
Gülle .....	2 ± 1
Alle anthropogenen Quellen ..	31 ± 12
Alle Quellen .....	50 ± 22,5

türlichen Böden variieren zwischen 5 und 15 Millionen Tonnen N pro Jahr (81). NO entsteht auf natürliche Weise auch bei der Blitzentladung in Gewittern, wodurch etwa 3 bis 8 Millionen Tonnen N in die Troposphäre abgegeben werden (82). In einem geringeren Umfang (0,5 bis 1,5 Millionen Tonnen N) wird NO<sub>x</sub> aus der Stratosphäre in die Troposphäre transportiert (83).

Die Hauptsenke des troposphärischen NO<sub>x</sub> ist seine photochemische Umwandlung in Salpetersäure, die während des Tages im wesentlichen durch die Reaktion zwischen NO<sub>2</sub> und OH und in der Nacht durch die Reaktion zwischen N<sub>2</sub>O<sub>5</sub> und Wasserdampf gebildet wird. Salpetersäure ist gut wasserlöslich und wird deshalb sehr schnell durch nasse Deposition, das heißt durch Regen, aus der Atmosphäre entfernt. Zusammen mit aus SO<sub>2</sub> gebildeter Schwefelsäure ist die Salpetersäure für die Übersäuerung des Niederschlags verantwortlich und trägt dadurch zu den regional beobachteten Schäden, unter anderem den Waldschäden in Europa und USA, bei. Die auf diese Weise aus der Atmosphäre ausgewaschene NO<sub>x</sub>-Menge wird auf 22 bis 80 Millionen Tonnen N pro Jahr geschätzt (84). Wegen der relativ kurzen Lebensdauer der Salpetersäure von etwa drei Tagen wird der in die Atmosphäre emittierte fixierte Stickstoff in der Nähe der Quellen deponiert (85). Dementsprechend werden die höchsten Depositionsraten über den Kontinenten, insbesondere über den USA und Europa, beobachtet.

Neben der Salpetersäure werden in der Troposphäre auch verschiedene organische Nitrate und Peroxyacetylnitrate, vor allem PAN (Peroxyacetylnitrat) durch photochemische Reaktionen gebildet (86). Von diesen Substanzen sind die Peroxyacetylnitrate von besonderem Interesse, da ihre Lebenszeit stark von der Temperatur abhängig ist (87). In der oberen Troposphäre und bei winterlichen Temperaturen kann die Lebenszeit von PAN Werte von mehreren Monaten erreichen und damit erheblich über den Lebenszeiten von NO<sub>2</sub> liegen. Aufgrund dieser Temperaturabhängigkeit kann reaktiver Stickstoff in der kalten oberen Troposphäre über weite Strecken transportiert und an Stellen wirksam werden, die über keine signifikanten NO<sub>x</sub>-Quellen verfügen.

Eine weitere Senke des troposphärischen NO<sub>x</sub> ist die trockene Deposition von NO<sub>2</sub> und Salpetersäure auf Pflanzenoberflächen. Depositionsraten können zur Zeit wegen unzureichender Daten noch nicht quantitativ angegeben werden. Das deponierte NO<sub>2</sub> wird von den Pflanzen aufgenommen und in Form von Nitrat als Nährstoff verwendet. Es ist nicht ausgeschlossen, daß ein Teil des auf diese Weise absorbierten NO<sub>x</sub> in reduzierter Form (zum Beispiel als NH<sub>3</sub>) wieder in die Atmosphäre emittiert wird.

#### – Flüchtige organische Kohlenstoffverbindungen

Die flüchtigen organischen Kohlenstoffverbindungen (VOC) der chemischen Klassen der Aliphate, Aromate, Alkohole, Aldehyde, Ketone und Fettsäuren werden oft nach ihren troposphärischen Verweilzeiten unterteilt, und zwar in langsam reagierende VOC mit Verweilzeiten von mehr als einer Woche, reaktive VOC mit Verweilzeiten von einem halben Tag bis zu einer Woche und in sehr reaktive VOC mit Verweilzeiten von wenigen Stunden und kürzer. Nach dem Methan sind das Äthan, das Methanol, das Acetylen und das Benzol die langlebigsten VOC (vgl. Tabelle 7). Die mittlere Verweilzeit der VOC in der Troposphäre nimmt im allgemeinen mit zunehmender Kohlenstoff-Kettenlänge exponentiell ab. Dementsprechend sind jeweils die Verbindungen mit der geringsten Kettenlänge die am häufigsten in der Troposphäre angetroffenen Substanzen.

Die flüchtige organische Kohlenstoffverbindung mit der höchsten Konzentration ist das Äthan, das in der unteren freien Troposphäre über den Kontinenten der Nordhemisphäre Werte von bis zu 3 ppbv erreicht. Das Acetylen, das praktisch gänzlich aus Verbrennungsprozessen stammt, erreicht im Winter in der unteren freien Troposphäre über den Kontinenten der Nordhemisphäre Konzentrationen von bis zu 1 ppbv, während die Benzol-Konzentration in der gleichen Jahreszeit bei maximal 0,6 ppbv liegt (88). Das häufigste Alken (Olefin) ist das Äthen, das in der unteren freien Troposphäre über den Kontinenten der Nordhemisphäre im Bereich von 0,2 bis 1,5 ppbv schwankt (89).

Alle VOC-Konzentrationen zeigen einen mehr oder weniger stark ausgeprägten Jahresgang (90). Sie nehmen allgemein mit der Höhe und mit abnehmender Breite ab und liegen in der Südhemisphäre deutlich niedriger als in den mittleren bis hohen Breiten der

Nordhemisphäre (91). Die VOC-Konzentrationen sind in Großstädten und industriellen Ballungsgebieten am höchsten und erreichen dort Werte zwischen 5 und 15 ppbv (92).

Die sauerstoffhaltigen Verbindungen fallen mit Ausnahme des Acetons und des Methanols in die Kategorie der reaktiven VOC. Über die Verteilung und Konzentration des troposphärischen Methanols ist sehr wenig bekannt. Messungen von Cavanaugh u. a. (93) deuten auf Maximalwerte des Methanols von bis zu 1 ppbv in bodennaher kontinentaler Reinluft hin. Allerdings sind diese Werte wegen der damals verwendeten Methode unsicher und bedürfen einer Verifizierung. Ähnliche Werte (2 ppbv) werden auch für das Formaldehyd berichtet (94). Die Konzentration von Aceton, dessen Verweilzeit in der unteren Troposphäre etwa 20 Tage beträgt, variiert in kontinentaler Reinluft in der Nordhemisphäre zwischen 0,2 und 2 ppbv (95). Die Konzentration von gasförmiger Ameisensäure (HCOOH) und Essigsäure (CH<sub>3</sub>COOH) in kontinentaler Reinluft liegen ebenfalls im Bereich von 0,2 bis 2 ppbv. Typische Mittelwerte sind 1 ppbv für HCOOH und 0,6 ppbv für CH<sub>3</sub>COOH (96).

Das Isopren und die Terpene stammen ausschließlich aus biologischen Quellen. Sie sind die reaktivsten troposphärischen VOC. Man kann sie daher praktisch nur in unmittelbarer Nähe ihrer Quellen messen. Dort

können sie allerdings zusammen Konzentrationen von bis zu 10 ppbv erreichen (97). Isopren ist die am häufigsten auftretende Verbindung dieser Gruppe von VOC.

VOC werden durch die Vegetation und die Ozeane in die Troposphäre emittiert. Die Emission von Äthen und Propen aus marinen Quellen wird auf 26 Millionen Tonnen Kohlenstoff pro Jahr geschätzt (98). Ältere Schätzwerte liegen noch höher (99). Die Emission von VOC durch die terrestrische Vegetation ist von einer Reihe von Umweltparametern (unter anderem Temperatur, Strahlung, relative Feuchte) abhängig und variiert dementsprechend stark. Über die Emission von niedermolekularen VOC (C<sub>2</sub> bis C<sub>8</sub>) durch Pflanzen ist bisher sehr wenig bekannt. Isopren wird durch Laubbäume und Sträucher produziert und emittiert. Die Terpene stammen dagegen vorwiegend von Koniferen. Die Emissionsrate von Isopren und den verschiedenen Terpenen wird weltweit auf etwa 1 000 Millionen Tonnen pro Jahr geschätzt (100). Die anthropogene Emission von VOC in die Atmosphäre dürfte gegenwärtig etwa 100 Millionen Tonnen pro Jahr betragen. Die anthropogenen VOC entstehen vorwiegend bei der Verbrennung fossiler Brennstoffe in Kraftfahrzeug- und Flugzeugmotoren, beim Transport und Abfüllen der entsprechenden Kraftstoffe, beim Umgang mit organischen Lösungsmitteln und bei der Verbrennung von Biomasse.

Tabelle 7

### Troposphärische Verweilzeiten verschiedener flüchtiger organischer Verbindungen entsprechend ihren Reaktionen mit OH-Radikalen und Ozon

Verweilzeit <sup>1)</sup>		Geschwindigkeitskonstante <sup>2)</sup> in billionstel cm <sup>3</sup> pro Molekül und Sekunde	Verweilzeit in Tagen	
Gas	Chemische Formel		Tropen	global
Äthan .....	C <sub>2</sub> H <sub>6</sub>	0,29	20	61
Methanol .....	CH <sub>3</sub> OH	0,80	6,5	15
Acetylen .....	C <sub>2</sub> H <sub>2</sub>	0,90	5,5	13
Benzol .....	C <sub>6</sub> H <sub>6</sub>	1,31	4,5	14
Propan .....	C <sub>3</sub> H <sub>8</sub>	1,59	3,6	11
n-Butan .....	C <sub>4</sub> H <sub>10</sub>	2,4	2,1	7,5
i-Butan .....	C <sub>4</sub> H <sub>10</sub>	2,3	2,2	8
Dimethylether .....	CH <sub>3</sub> OCH <sub>3</sub>	2,6	1,9	7
Äthylalkohol .....	C <sub>2</sub> H <sub>5</sub> OH	3,0	1,8	5,9
n-Pentan .....	n-C <sub>5</sub> H <sub>12</sub>	3,7	1,5	4,8
Toluol .....	C <sub>6</sub> H <sub>5</sub> CH <sub>3</sub>	6,19	0,9	2,8
Äthylbenzol .....	C <sub>6</sub> H <sub>5</sub> C <sub>2</sub> H <sub>5</sub>	7,73	0,75	2,5
Äthen .....	C <sub>2</sub> H <sub>4</sub>	7,85	0,70	1,9
Formaldehyd .....	HCHO	10	0,5	0,9
o-Xylol .....	C <sub>6</sub> H <sub>4</sub> (CH <sub>3</sub> ) <sub>2</sub>	14	0,35	0,7
Acetaldehyd .....	CH <sub>3</sub> CHO	16	0,3	0,6
Propen .....	C <sub>3</sub> H <sub>6</sub>	29	0,2	0,4

1) Die Verweilzeiten wurden für 30 ppbv Ozon und für eine OH-Konzentration von 2 Millionen Moleküle pro cm<sup>3</sup> (24-Stunden-Durchschnitt) für tropische Breite und 650 000 Moleküle pro cm<sup>3</sup> für den globalen Mittelwert berechnet.

2) Für die Reaktion mit OH.

Die VOC werden in der Troposphäre nahezu ausschließlich durch die Reaktion mit OH-Radikalen und im Falle der ungesättigten Verbindungen (Alkene, Isopren, Terpene) über die Addition von Ozon (Criegee-Reaktion) zu  $\text{CO}_2$  und Wasserdampf abgebaut. Der Abbau erfolgt über viele Zwischenstufen, die nur zum Teil bekannt sind und zu einer Vielfalt reaktiver Zwischenprodukte, unter anderem Aldehyden, Ketonen und organischen Säuren, führen. Bei ausreichend hohen  $\text{NO}_x$ -Konzentrationen wird dabei in der Troposphäre Ozon gebildet (101).

## 2. Änderung von Klimaparametern in der jüngsten Vergangenheit

### 2.1 Langzeittrends klimarelevanter Spurengase und ihre Ursachen

Die Konzentrationen wichtiger atmosphärischer Spurengase werden erst seit der jüngsten Vergangenheit routinemäßig erfaßt. Die längste Meßreihe liegt für das Kohlendioxid vor, das seit 1958 auf der Station Mauna Loa (Hawaii) routinemäßig gemessen wird. Inzwischen werden derartige Messungen auch an anderen, weltweit verteilten Stationen durchgeführt und seit den siebziger Jahren dabei auch andere klimarelevante Spurengase wie  $\text{CH}_4$ ,  $\text{N}_2\text{O}$  und FCKW erfaßt. Die dabei erzielten Ergebnisse lassen Aussagen über das zeitliche Verhalten dieser Spurengase während der vergangenen 10 bis 30 Jahre zu.

Weiter zurückreichende Informationen über die zeitliche Veränderung der chemischen Zusammensetzung der Atmosphäre geben Analysen der in Eisproben eingeschlossenen Luftblasen, die im Falle der in der Antarktis gezogenen Eisbohrkerne bis zu 160 000 Jahre zurückdatiert werden können. Diese Luftblasen werden bei der Bildung des Gletschereises eingeschlossen und so dem Gasaustausch mit der Atmosphäre entzogen. Da die Eisbildung in den Polargebieten ohne Sommertauwetter je nach den lokalen Bedin-

gungen 10 bis 1 000 Jahre dauern kann, repräsentiert die auf diese Weise konservierte Luftblase einen Mittelwert der atmosphärischen Spurengas-Konzentration über diesen Zeitraum. Selbstverständlich ist diese Methode nur auf solche Gase anwendbar, die in den Eisproben stabil sind und nicht durch das Eis diffundieren.

#### 2.1.1 Wasserdampf

Wasserdampf ist das wichtigste klimarelevante Spurengas. Quantitative Aussagen über einen globalen Trend des Wasserdampfgehaltes der Atmosphäre sind deshalb von großer Bedeutung. Wasserdampf-Messungen werden in der freien, ungestörten Atmosphäre erst seit Beginn des Internationalen Geophysikalischen Jahres 1958 mit einer ausreichenden globalen Abdeckung der Erdoberfläche durchgeführt, so daß Meßdaten lediglich für eine relativ kurze Zeitspanne vorliegen. Die Vergleichbarkeit der in dieser Zeit erzielten Meßergebnisse ist allerdings wegen der Verwendung unterschiedlicher Radiosonden-Typen sowie des wiederholten Wechsels der Wasserdampfsensoren nicht in allen Fällen gesichert. Erschwerend kommt hinzu, daß die registrierten Meßdaten wegen der starken zeitlichen und räumlichen Schwankungen der Wasserdampfkonzentration in der Atmosphäre in der Vergangenheit nicht immer mit der für die Identifizierung von Trends einer derart schwankenden Größe notwendigen Sorgfalt ausgewertet worden sind.

Man kann jedoch generell davon ausgehen, daß der Wasserdampfgehalt der Atmosphäre in den vergangenen hundert bis zweihundert Jahren wegen der allgemeinen Temperaturzunahme und der damit verbundenen Zunahme der Verdunstung an der Meeresoberfläche zugenommen hat. Da die Verdunstung von Wasser exponentiell mit der Wassertemperatur zunimmt, sollte sich dieser Effekt am ehesten in den tropischen Breiten bemerkbar gemacht haben. In der Tat

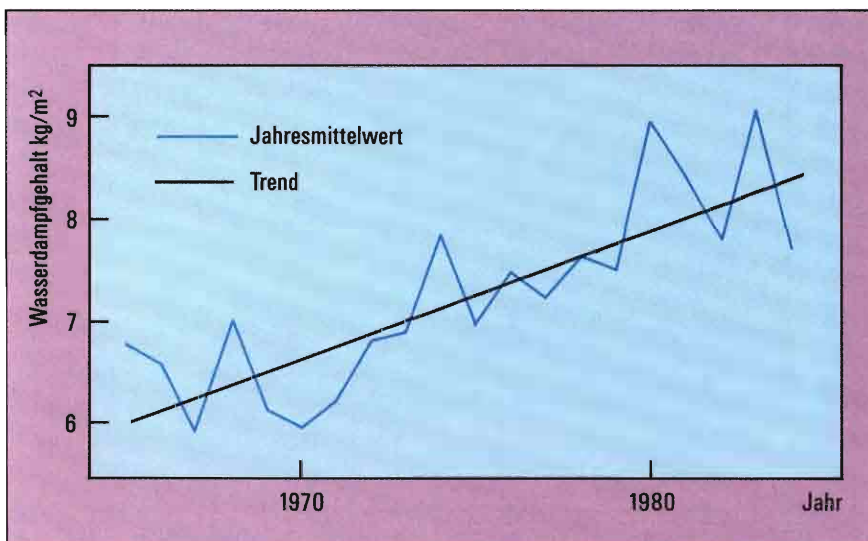


Abb. 7: Zunahme des Wasserdampf-Gehalts in 3 bis 6 km Höhe an 4 Stationen im äquatorialen Pazifik (106).

zeigt die Analyse der zwischen 1965 und 1984 durchgeführten Radiosonden-Messungen an 25 in den Tropen gelegenen Radiosonden-Stationen eine deutliche Zunahme des Wasserdampfgehaltes der freien Troposphäre (102), während im globalen Maßstab für die Jahre von 1978 bis 1985 kein eindeutiger Trend auszumachen war (103). An vier ausgesuchten Stationen im tropischen Pazifik ( $10^{\circ}\text{N} - 10^{\circ}\text{S}$ ) ist die (vertikale) Säulendichte des Wasserdampfes in der Höhenschicht zwischen 3 und 6 km von etwa  $6 \text{ kg pro m}^2$  im Jahre 1965 auf  $8 \text{ kg pro m}^2$  im Jahre 1984 (vgl. Abbildung 7) oder um mehr als 30 Prozent angestiegen. Die über eine Höhe von 0 bis 9 km integrierte Säulendichte des Wasserdampfes ist im gleichen Zeitraum von 45 auf  $63 \text{ kg pro m}^2$  angewachsen (104). Dieses Ergebnis

wird durch neuere Analysen von Radiosondendaten bestätigt (105), nach denen der über die Troposphäre gemittelte Wasserdampfgehalt um einige Prozent während des vergangenen Jahrzehnts zugenommen hat.

Diese Zunahme ist auf eine Zunahme der Verdunstung des Oberflächenwassers der tropischen Ozeane wegen des allgemein beobachteten Anstiegs der Wassertemperatur der Oberfläche und der Windgeschwindigkeit in diesen Gebieten zurückzuführen, die auf rund 10 Prozent geschätzt wird (107). Damit ist ein um 10 bis 12 Watt pro  $\text{m}^2$  erhöhter Verdunstungsfluß verbunden. Dieser zusätzliche Transport von latenter Energie in die Troposphäre hat zur Folge, daß

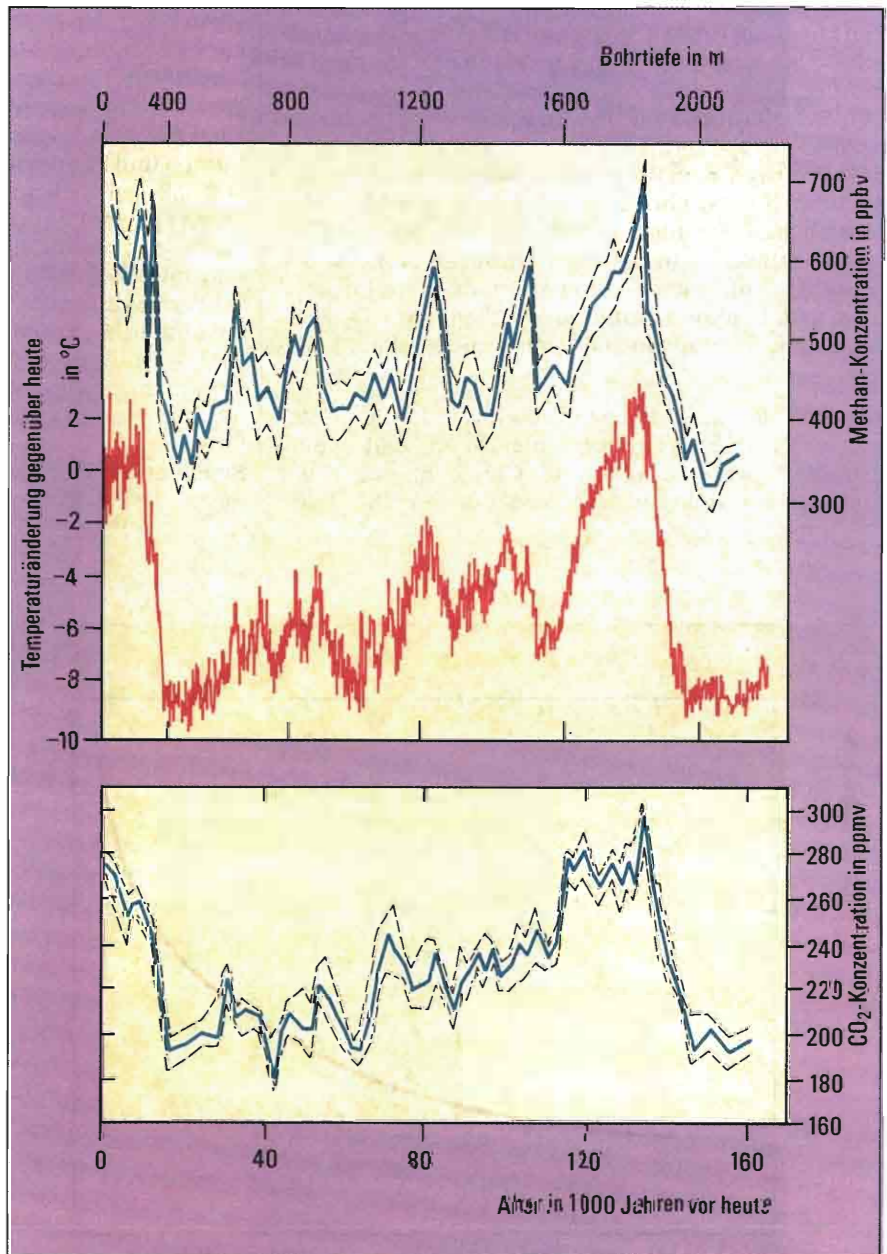


Abb. 8: Zeitliche Variation der  $\text{CH}_4$ - und  $\text{CO}_2$ -Konzentration während der vergangenen 160 000 Jahre, ermittelt aus dem Vostok-Eisbohrkern. Zum Vergleich ist in der mittleren Kurve die aus den Isotopenverhältnissen bestimmte Temperatur in der Region aufgetragen (108).

sich die vertikale Temperaturverteilung in der tropischen Troposphäre ändert. Dies dürfte sich auf die Wolkenbildung, insbesondere auf die Art, Höhe und Flächenbedeckung der Wolken, auswirken, die wiederum für das regionale und globale Klima wesentlich sind.

### 2.1.2 Kohlendioxid

Die in den Sedimenten gespeicherten Informationen sowie die chemische Analyse der aus verschiedenen, vor allem antarktischen Eisbohrkernen extrahierten, Luftproben zeigen eindeutig, daß das atmosphärische  $\text{CO}_2$  schon immer, auch in prähistorischer Zeit, starken zeitlichen Fluktuationen unterlag. In den zurückliegenden 160 000 Jahren variierte die  $\text{CO}_2$ -Konzentration zwischen 190 und 300 ppmv (vgl. Abbildung 8) und lag damit erheblich unter dem heute in der Atmosphäre beobachteten Wert von 354 ppmv. Deutlich ist in Abbildung 8 die positive Korrelation zwischen der  $\text{CO}_2$ -Konzentration und der Temperatur zu erkennen. Niedrige  $\text{CO}_2$ -Werte werden in den Kaltzeiten, hohe  $\text{CO}_2$ -Werte in den Warmzeiten beobachtet. Von Bedeutung für die nachfolgende Diskussion über den zusätzlichen Treibhauseffekt des  $\text{CO}_2$  ist die Tatsache, daß selbst in der Eem-Warmzeit (vor 130 000 Jahren), als die mittlere Temperatur um etwa 1 bis 2°C über dem heutigen mittleren Wert lag, die  $\text{CO}_2$ -Konzentration Werte von 300 ppmv nicht überstiegen hat.

Mit Hilfe der aus dem Eisbohrkern von der Siple-Station in der Antarktis gewonnenen Daten (109) ist eine detaillierte Rekonstruktion der  $\text{CO}_2$ -Zunahme in der Troposphäre während der vergangenen 200 Jahre

möglich. Danach beginnt das  $\text{CO}_2$  um das Jahr 1800 in der Troposphäre anzusteigen. Zur letzten Jahrhundertwende wurden bereits Werte von 295 ppmv erreicht. Die Ergebnisse der am Observatorium auf dem Mauna Loa (Hawaii) im Jahre 1958 begonnenen Direktmessungen (110) schließen sich bei einem Wert von 315 ppmv nahtlos an die aus den Eisbohrkerndaten rekonstruierte zeitliche Entwicklung der troposphärischen  $\text{CO}_2$ -Konzentration an (vgl. Abbildung 9). Zu dieser Zeit betrug der jährliche Anstieg 0,6 ppmv pro Jahr. Diese Rate ist im Jahre 1990 auf einen Wert von etwa 1,6 ppmv pro Jahr angestiegen. Bei einer mittleren globalen troposphärischen  $\text{CO}_2$ -Konzentration von 354 ppmv entspricht das einem prozentualen Anstieg von 0,45 Prozent pro Jahr.

Der beobachtete Anstieg des troposphärischen  $\text{CO}_2$  ist auf die steigende anthropogene  $\text{CO}_2$ -Emission, vor allem durch die Verbrennung fossiler Brennstoffe und die Umwandlung von Wäldern in landwirtschaftliche Nutzfläche, zurückzuführen. Die  $\text{CO}_2$ -Emission durch die Verbrennung fossiler Brennstoffe begann etwa um 1860 mit dem Beginn der industriellen Revolution in Europa und Nordamerika. Während um das Jahr 1880 erst 0,2 Milliarden Tonnen fossiler Kohlenstoff pro Jahr verbrannt wurden, ist dieser Anteil zur Jahrhundertwende bereits auf 0,5 Milliarden Tonnen pro Jahr und im Jahre 1914 auf 0,95 Milliarden Tonnen pro Jahr angestiegen und hat heute einen Wert von 5,6 Milliarden Tonnen pro Jahr erreicht. Etwa 95 Prozent der industriellen  $\text{CO}_2$ -Emissionen erfolgen in der Nordhemisphäre und dort vor allem in den industriell hochentwickelten Ländern, in denen der jährliche  $\text{CO}_2$ -Ausstoß Werte von bis zu 20 Tonnen pro Kopf der Bevölkerung erreicht hat (111). Dagegen liegt der industrielle Pro-Kopf-Ausstoß von  $\text{CO}_2$  in den meisten

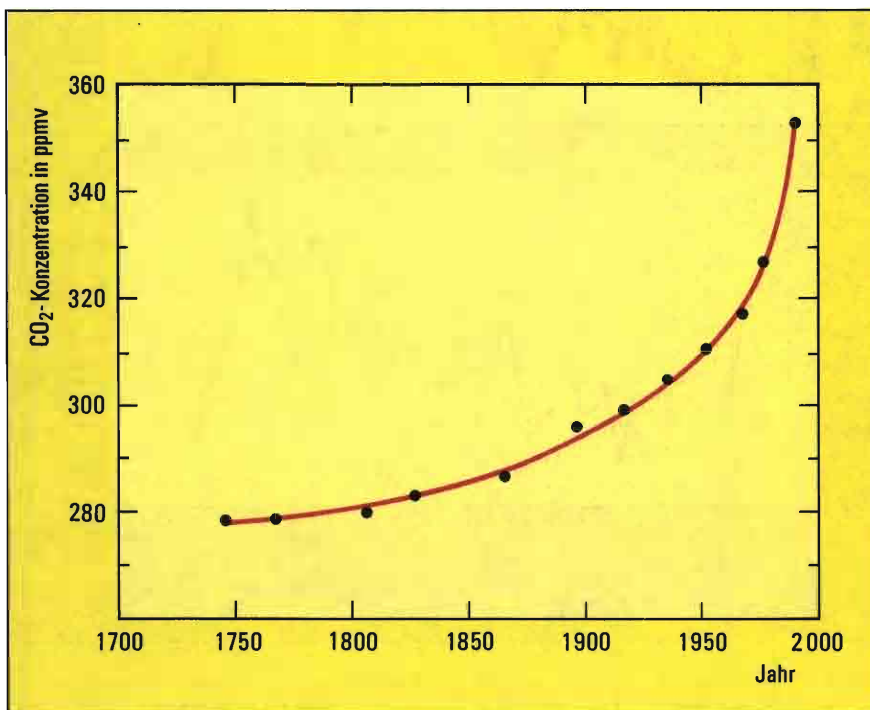


Abb. 9: Zeitlicher Trend der atmosphärischen  $\text{CO}_2$ -Konzentration.



Entwicklungsländern unter einer Tonne pro Jahr. In diesen Ländern ist der CO<sub>2</sub>-Ausstoß in den vergangenen Jahrzehnten um 6 Prozent pro Jahr angestiegen. Demgegenüber steigt der Verbrauch an fossilen Brennstoffen in Westeuropa und Nordamerika derzeit mit nur 0,5 bis 1,0 Prozent pro Jahr an.

Die zeitliche Entwicklung der anthropogenen CO<sub>2</sub>-Emission durch die Rodung großer Waldgebiete, die Verbrennung und Verwesung gerodeter Biomasse und die landwirtschaftliche Nutzung vormals natürlicher Böden ist wesentlich schwieriger abzuschätzen als der CO<sub>2</sub>-Ausstoß durch die Verbrennung fossiler Brennstoffe. Die gesamte CO<sub>2</sub>-Emission durch Urbarmachung und landwirtschaftliche Nutzung vorher naturbelassener Landflächen wird für die Zeit von 1850 bis 1985 auf 420±130 Milliarden Tonnen geschätzt (112). Der kumulative CO<sub>2</sub>-Ausstoß durch Verbrennung fossiler Brennstoffe wird für den gleichen Zeitraum auf 700±70 Milliarden Tonnen angegeben. Während im 19. und frühen 20. Jahrhundert die CO<sub>2</sub>-Emission vor allem durch Urbarmachung von Bodenflächen in den gemäßigten Klimazonen verursacht wurde, hat sich der Schwerpunkt dieser CO<sub>2</sub>-Emission nach dem zweiten Weltkrieg in die Tropen verlagert. Die derzeitige globale jährliche Emission durch veränderte Landnutzung in den Tropen, unter anderem durch die Rodung tropischer Wälder, wird für das Jahr 1980 auf ein bis zwei Milliarden Tonnen geschätzt und scheint seitdem erheblich zugenommen zu haben (113). Demnach beträgt die CO<sub>2</sub>-Freisetzung 25 Prozent des fossilen CO<sub>2</sub>-Ausstoßes und trägt damit signifikant zum Anstieg des atmosphärischen CO<sub>2</sub>-Gehalts bei.

Gegenwärtig werden etwa 60 Prozent der globalen anthropogenen CO<sub>2</sub>-Emission durch die Ozeane und durch die kontinentale Biosphäre aufgenommen. Die restlichen 40 Prozent verbleiben in der Atmosphäre und bewirken den beobachteten CO<sub>2</sub>-Anstieg. Die Aufnahme des anthropogenen CO<sub>2</sub> scheint sich zu etwa gleichen Teilen auf die Ozeane und die kontinentale Biosphäre zu verteilen. Diese Annahme wird durch Simulationsergebnisse gekoppelter, dreidimensionaler Modelle der ozeanischen Zirkulation gestützt, mit deren Hilfe der CO<sub>2</sub>-Austausch zwischen Atmosphäre und Ozean berechnet werden kann (114). Die ersten Ergebnisse zeigen, daß die Ozeane nicht mehr als zwei Milliarden Tonnen oder 50 Prozent des aus menschlichen Quellen emittierten CO<sub>2</sub> aufnehmen. Es muß demnach eine weitere Senke für das anthropogene CO<sub>2</sub> existieren. Eine ähnliche Schlußfolgerung wird aus der beobachteten Differenz der troposphärischen CO<sub>2</sub>-Konzentrationen beider Hemisphären gezogen, die kleiner ist als dies aufgrund der Breitenverteilung der anthropogenen CO<sub>2</sub>-Emission erwartet werden darf. Daraus wird auf die Existenz einer großen CO<sub>2</sub>-Senke in der Nordhemisphäre geschlossen (115). Eine marine Senke mit einer entsprechend hohen Aufnahme rate konnte bisher nicht identifiziert werden, so daß generell angenommen wird, daß dieser CO<sub>2</sub>-Anteil in der terrestrischen Biomasse der Nordhemisphäre gespeichert wird. Die zusätzliche Speicherung von Kohlenstoff in der terrestrischen Biomasse könnte auf die höhere Produktivität von Pflanzen bei gesteigener CO<sub>2</sub>-Konzentrationen (CO<sub>2</sub>-Düngung) zurückgeführt werden. Dieser Effekt

kann durch die ungewollte Düngung mit Stickstoff verstärkt werden, der in Form von Stickstoffmonoxid und Ammoniak durch Verbrennungsprozesse, diverse industrielle Aktivitäten und Tierhaltung in zunehmenden Mengen in die Atmosphäre emittiert und in Form von Nitrat wieder aus der Atmosphäre ausgewaschen und der Vegetation zugeführt wird (vgl. 3. Kapitel, Nr. 3).

Ob und wie lange die Senken des anthropogenen CO<sub>2</sub> im Meer und auf den Kontinenten auch in Zukunft mit der gleichen Effektivität arbeiten werden, ist heute noch nicht abzuschätzen. Mittel- bis langfristig wird die Aufnahmefähigkeit der kontinentalen Biosphäre wegen der Limitierung durch andere, das Wachstum der Pflanzen bestimmende Faktoren nachlassen, so daß dann die CO<sub>2</sub>-Konzentration relativ zur anthropogenen CO<sub>2</sub>-Emission überproportional anwachsen wird.

In jedem Fall wird das anthropogen emittierte CO<sub>2</sub> wegen seiner langen Verweilzeit die troposphärische CO<sub>2</sub>-Konzentration noch weit in die Zukunft beeinflussen. Heutige Box-Modelle (116) und ozeanische Zirkulationsmodelle (117) sagen voraus, daß, selbst wenn es gelänge, die anthropogene CO<sub>2</sub>-Gesamtemissionsrate auf dem gegenwärtigen Stand „einzufrieren“, die troposphärische CO<sub>2</sub>-Konzentration weiter ansteigen und im Jahr 2050 einen Wert von etwa 450 ppmv, im Jahr 2100 sogar einen Wert von 520 ppmv erreichen würde. Für die Stabilisierung der troposphärischen CO<sub>2</sub>-Konzentration wäre eine sofortige Reduktion der globalen anthropogenen CO<sub>2</sub>-Emission um 50 bis 80 Prozent erforderlich (118).

### 2.1.3 Methan

Die zeitliche Entwicklung des troposphärischen CH<sub>4</sub>-Pegels läßt sich ebenfalls durch die Analyse der in Eisbohrkernen enthaltenen Luftblasen weit zurückverfolgen. Mittlerweile gibt es eine Reihe guter Datensätze von Eisbohrkernen aus Grönland und der Antarktis (119), die eine gute Korrelation der troposphärischen CH<sub>4</sub>-Gehalts mit der CO<sub>2</sub>-Konzentration und den polaren Temperaturen zeigen (vgl. Abbildung 8). Niedrige troposphärische CH<sub>4</sub>-Konzentrationen (etwa 0,35 ppmv) wurden jeweils während der Kaltzeiten und Maximalwerte (0,65 ppmv) während der Warmzeiten beobachtet. Seit der vorindustriellen Zeit ist die mittlere globale troposphärische CH<sub>4</sub>-Konzentration von 0,7 bis 0,8 ppmv exponentiell auf den heutigen Wert von 1,72 ppmv gestiegen. Der Anstieg des troposphärischen CH<sub>4</sub> erfolgt nahezu parallel zum Wachstum der Weltbevölkerung (vgl. Abbildung 6).

Systematische in-situ Messungen des troposphärischen CH<sub>4</sub>-Gehalts werden seit 1978 durchgeführt. In dieser Zeit ist die mittlere globale troposphärische Konzentration von 1,5 ppmv auf den heutigen Wert von 1,7 bis 1,8 ppmv angestiegen. Die Zuwachsraten betragen im Zeitraum zwischen 1962 und 1979 etwa 13 ppbv pro Jahr (120). In den vergangenen acht Jahren lag der Anstieg im Mittel sogar bei 17 ppbv oder 1 Prozent pro Jahr.

Der beobachtete Anstieg des atmosphärischen CH<sub>4</sub>-Gehalts wird durch den Anstieg der globalen CH<sub>4</sub>-

Emission erklärt (121). Unter Nutzung statistischer Angaben wurde die zeitliche Entwicklung der Quellstärken der einzelnen in Tabelle 2 aufgeführten Quellen für den Zeitraum zwischen 1940 und 1980 geschätzt. Danach ist die  $\text{CH}_4$ -Emission aufgrund der erhöhten Kohleförderung, der Ausdehnung des Erdgasnetzes, des weltweit wachsenden Rinderbestandes, der Zunahme der Anbaufläche von Naßreis (durch „multiple cropping“) und der zunehmenden Biomasseverbrennung, insbesondere in den Tropen, weltweit angestiegen. Über den Zeitraum von 1940 bis 1980 gemittelt beträgt der Anstieg etwa 4 Millionen Tonnen pro Jahr (vgl. Abbildung 10). Das reicht in etwa aus, die Zunahme der atmosphärischen  $\text{CH}_4$ -Konzentration zu erklären.

Es ist nicht ausgeschlossen, daß auch die Zersetzungsraten der  $\text{CH}_4$ -Hydrate in Permafrost-Böden aufgrund

der in den hohen Breiten angestiegenen Temperatur zugenommen und zu einer Zunahme der  $\text{CH}_4$ -Emission geführt haben. Quantitative Angaben lassen sich aber nicht machen. Das gleiche trifft auch für die  $\text{CH}_4$ -Emissionen aus den natürlichen Feuchtgebieten zu, die empfindlich auf Temperaturschwankungen reagieren. Eine mögliche Zunahme der  $\text{CH}_4$ -Emission aus den Feuchtgebieten kann allerdings durch Nutzungsänderungen der Feuchtgebiete, zum Beispiel durch Trockenlegung von Sumpfbereichen, mehr als ausgeglichen werden (123).

Ursache für den beobachteten Anstieg des troposphärischen  $\text{CH}_4$ -Gehalts kann auch sein, daß die Senken mit der Zeit schwächer werden. Von besonderer Bedeutung ist in diesem Zusammenhang die mögliche Abnahme der mittleren OH-Konzentration in der Troposphäre, die durch die Zunahme der Emission der

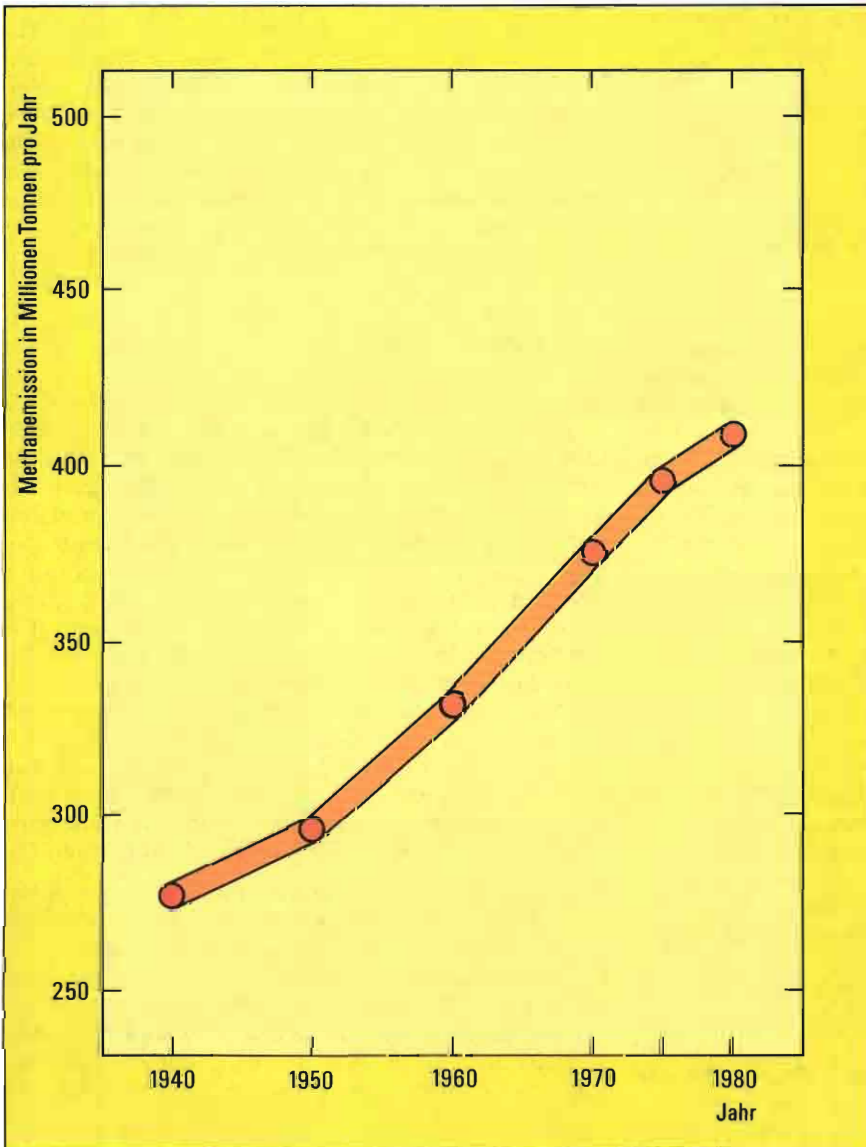


Abb. 10: Trend der globalen  $\text{CH}_4$ -Emission zwischen 1940 und 1980 (122).

wesentlichen Reaktionspartner der OH-Radikale erklärt werden kann. Zu diesen Reaktionspartnern zählen das Kohlenmonoxid, das Methan und die Kohlenwasserstoffe. Mit Hilfe globaler Modelle der Atmosphärenchemie und unter Verwendung der vorliegenden Emissionsdaten wird der mögliche Beitrag einer abnehmenden Senkenstärke zum beobachteten  $\text{CH}_4$ -Anstieg auf etwa 20 bis 80 Prozent geschätzt (124).

Im Vergleich zur Verweilzeit des anthropogenen  $\text{CO}_2$  von 120 Jahren ist die troposphärische Verweilzeit des  $\text{CH}_4$  mit etwa 8 Jahren relativ kurz. Dies bedeutet, daß das troposphärische  $\text{CH}_4$  relativ schnell auf eine Reduzierung der Emissionen reagieren wird. Um die mittlere globale  $\text{CH}_4$ -Konzentration bei dem heutigen Wert zu fixieren, bedarf es einer sofortigen Reduktion der globalen anthropogenen Emissionen um 10 bis 20 Prozent (125).

### 2.1.4 Distickstoffoxid

Die chemische Analyse der im Gletschereis der polaren Eiskappen eingeschlossenen Luft gibt auch Informationen über die zeitliche Entwicklung der mittleren globalen  $\text{N}_2\text{O}$ -Konzentration in der Troposphäre. Allerdings sind die bisher vorliegenden Datensätze (126) nicht so detailliert und reichen auch nicht so weit in die Klimageschichte zurück wie die für das  $\text{CO}_2$  und das  $\text{CH}_4$ . Diese Daten zeigen eindeutig, daß die vorindustrielle globale  $\text{N}_2\text{O}$ -Konzentration in der Troposphäre mit einem Wert von etwa 285 ppbv signifikant unter dem heutigen Wert gelegen hat. Der Anstieg des  $\text{N}_2\text{O}$ -Gehalts in der Troposphäre begann in der Mitte des 19. Jahrhunderts und hat inzwischen

eine über die vergangenen zehn Jahre gemittelte Rate von 0,2 bis 0,3 Prozent pro Jahr erreicht (127).

Da die  $\text{N}_2\text{O}$ -Emission durch die Verbrennung fossiler Brennstoffe nach neuesten Erkenntnissen nur eine untergeordnete Rolle im troposphärischen  $\text{N}_2\text{O}$ -Kreislauf spielt, wird allgemein davon ausgegangen, daß der beobachtete Anstieg des troposphärischen  $\text{N}_2\text{O}$  vor allem durch den steigenden Einsatz stickstoffhaltiger Mineräldünger und durch die zunehmende Verbrennung von Biomasse, insbesondere in den Tropen, verursacht worden ist. Dieser Anstieg kann teilweise auch durch die gesteigerte  $\text{N}_2\text{O}$ -Emission aus den durch die Brandrodung beeinflussten Böden erklärt werden (128). Diese gesteigerten  $\text{N}_2\text{O}$ -Emissionen sind jedoch nicht über längere Zeit wirksam, sondern klingen schon nach einem halben Jahr wieder ab. Da ein erheblicher Teil der gerodeten Fläche langfristig in Weideland überführt wird und die  $\text{N}_2\text{O}$ -Emissionsraten aus Weideflächen erheblich unter den entsprechenden Raten aus primären Waldböden liegen (129), ist es zweifelhaft, ob die Landnutzungsänderungen mittelfristig überhaupt zu einem Anstieg des troposphärischen  $\text{N}_2\text{O}$  beitragen. Die Stabilisierung der mittleren globalen troposphärischen  $\text{N}_2\text{O}$ -Konzentration auf den heutigen Wert würde wegen der langen Verweilzeit des  $\text{N}_2\text{O}$  in der Troposphäre eine sofortige Reduzierung der globalen anthropogen bedingten Emission um etwa 80 Prozent erfordern (130).

### 2.1.5 Halogenierte Kohlenwasserstoffe

Die vollhalogenierten Kohlenwasserstoffe sind ausschließlich industrieller Herkunft. Wegen der zunehmenden Emissionsraten steigen ihre Konzentrationen

Tabelle 8

Mittlere globale Konzentrationen, Zeittrends und Verweilzeiten verschiedener halogener Kohlenwasserstoffe in der Troposphäre im Jahre 1990<sup>1)</sup>.

Spezies	Konzentration in pptv	Jährliche Anstiegsrate		Atmosphärische Verweilzeit in Jahren
		in pptv	in %	
$\text{CFCl}_3$ (FCKW 11) .....	280	10	4	60
$\text{CF}_2\text{Cl}_2$ (FCKW 12) .....	484	17	4	130
$\text{CF}_3\text{Cl}$ (FCKW 13) .....	5			400
$\text{C}_2\text{F}_3\text{Cl}_3$ (FCKW 113) .....	60	4–6	8	90
$\text{C}_2\text{F}_4\text{Cl}_2$ (FCKW 114) .....	15			200
$\text{C}_2\text{F}_5\text{Cl}$ (FCKW 115) .....	5			400
$\text{CHF}_2\text{Cl}$ (H-FCKW 22) .....	122	7	6	15
$\text{CCl}_4$ .....	146	2	1,5	50
$\text{CH}_3\text{CCl}_3$ .....	158	6	4	7
$\text{CH}_3\text{Cl}$ .....	600			1,5
$\text{CF}_2\text{ClBr}$ (Halon 1211) .....	1,7	0,2	12	25
$\text{CF}_3\text{Br}$ (Halon 1301) .....	2,0	0,3	15	110
$\text{CH}_3\text{Br}$ .....	10–15			1,5

1) Die Konzentrationen für 1990 wurden aus den Meßwerten für die Jahre 1987/88 und den zuletzt bestimmten Zeittrends errechnet.

in der Troposphäre (131). Das gleiche gilt für die teilhalogenierten Verbindungen, die im Gegensatz zu den vollhalogenierten Verbindungen vornehmlich in der Troposphäre abgebaut werden (132). Die mittleren globalen troposphärischen Konzentrationen ausgewählter halogener Kohlenwasserstoffe, ihre jährlichen Zuwachsraten und ihre Verweilzeiten in der Troposphäre sind in Tabelle 8 zusammengestellt. Prozentual gesehen weisen die halogenierten Kohlenwasserstoffe die höchsten Zuwachsraten aller klimarelevanten atmosphärischen Spurengase auf.

Wegen ihrer langen troposphärischen Verweilzeiten müßten die Emissionen der FCKW 11, 12 und 113 sofort um 75 Prozent, 80 Prozent beziehungsweise 90 Prozent reduziert werden, wenn ein weiterer Anstieg ihrer globalen troposphärischen Konzentrationen verhindert werden soll (133). Dieses Ziel ist bei der Verschärfung des im Jahre 1988 in Montreal vereinbarten internationalen „Protokolls zur Reduzierung ozonstörender halogener Verbindungen“ im Juni 1990 in London noch nicht in vollem Umfang erreicht worden.

### 2.1.6 Ozon in der Troposphäre

Durch Ozon-Messungen mit Hilfe von Satelliten (SAGE I und II, TOMS auf Nimbus 7), Ozon-Sonden (Ballon-Aufstiege) und bodengestützte Instrumente (Umkehr-Methode) ist eindeutig nachgewiesen worden, daß die Gesamtsäulendichte des Ozons in der Stratosphäre seit den siebziger Jahren um einige Prozent abgenommen hat.

Dagegen wird eine Zunahme der Konzentration des Ozons in der Troposphäre festgestellt, die offensichtlich bereits in der zweiten Hälfte des 19. Jahrhunderts begonnen hat. Die ältesten Daten über den Ozongehalt in bodennahen Luftmassen gehen auf Messungen zurück, die in den Jahren 1876 bis 1910 in der Nähe von Paris (Montsouris) durchgeführt und vor kurzem verifiziert worden sind (134). Aus diesen Messungen wurde geschlossen, daß die  $O_3$ -Konzentrationen im Jahresmittel um den Faktor 2 bis 3 unter den heute in ländlichen Gebieten in Europa und Nordamerika angetroffenen Werten liegen. Im gleichen Zeitraum hat sich auch die jahreszeitliche Variation des troposphärischen Ozons verändert. Deutlich ist eine Verschiebung des Ozon-Maximums aus dem Frühjahr in den Frühsommer zu erkennen, gekoppelt mit einer gleichzeitigen Zunahme der Jahresamplitude. Dadurch erhöht sich die Differenz zwischen den früher und heute angetroffenen  $O_3$ -Werten in der Sommersaison auf den Faktor 4 bis 6. Diese Verschiebung des Maximums ist ein Hinweis auf die zunehmende Bedeutung der photochemischen Ozon-Produktion in der Troposphäre.

Kontinuierliche in-situ Messungen des Ozons in der Troposphäre werden erst seit Anfang der sechziger Jahre an einer zunehmenden Anzahl von Meßstationen durchgeführt (135). Diese Messungen werden durch Ozonsonden-Aufstiege ergänzt, die Hinweise über die zeitlichen Änderungen der  $O_3$ -Konzentration in der Troposphäre und Stratosphäre geben. Die zur Zeit vorliegenden Daten sind von verschiedenen Au-

stiegen (136) zusammengetragen und analysiert worden. Eine detaillierte Zusammenfassung der Ergebnisse gibt Crutzen (137).

Die vorliegenden Daten zeigen übereinstimmend, daß die  $O_3$ -Konzentration in ländlichen Gebieten der Nordhemisphäre mit der Zeit von 10 bis 15 ppbv in der ersten Hälfte dieses Jahrhunderts auf etwa 30 bis 50 ppbv heutzutage angestiegen ist. In den vergangenen 20 Jahren ist die  $O_3$ -Konzentration in reinen Luftmassen im Mittel um jährlich ein Prozent angestiegen (138). In bodennahen verschmutzten Luftmassen der Nordhemisphäre hat sich die  $O_3$ -Konzentration im gleichen Zeitraum sogar verdoppelt (139). Die zeitliche Variation und der langfristige Anstieg des troposphärischen Ozons sind in Abbildung 11 illustriert. Deutlich sind die jahreszeitlichen Schwankungen der  $O_3$ -Konzentration mit Maximalwerten im Frühsommer zu erkennen, denen ein langfristiger Trend mit einem über die elfjährige Meßperiode gemittelten Anstieg von etwa zwei Prozent pro Jahr überlagert ist. Diese Messungen sind oberhalb der planetarischen Grenzschicht erfolgt und damit repräsentativ für einen großen Bereich der freien Troposphäre in mittleren Breiten der Nordhemisphäre. Die Ergebnisse langjähriger Ozonsonden-Aufstiege, die seit 1967 routinemäßig am Observatorium Hohenpeißenberg des Deutschen Wetterdienstes im bayerischen Voralpengebiet durchgeführt wurden (140), zeigen, daß diese Zunahme der Ozonkonzentration in allen oberhalb der planetarischen Grenzschicht liegenden Höhen der Troposphäre erfolgt.

Im Gegensatz zur Nordhemisphäre lassen die in der Südhemisphäre durchgeführten Messungen keinen zusätzlichen Trend der  $O_3$ -Konzentration erkennen. Die  $O_3$ -Werte schwanken zwischen 12 ppbv im Winter und 30 ppbv im Sommer (141) und liegen damit im Bereich der Anfang dieses Jahrhunderts über Europa beobachteten Werte.

### 2.1.7 Indirekt klimawirksame Spurengase

Menschliche Aktivitäten haben auch zu Änderungen der Emissionen indirekt klimawirksamer Spurengase geführt, die im Zuge der industriellen Entwicklung an Intensität zugenommen haben. Dementsprechend ist davon auszugehen, daß sich auch die Konzentrationen dieser Gase in der Troposphäre erhöht haben. Globale Trends ihrer Konzentrationen lassen sich wegen der noch unzureichenden Datenbasis zur Zeit nicht mit der notwendigen Sicherheit ableiten. Derartige Abschätzungen werden noch durch die relativ kurzen Verweilzeiten dieser Gase von weniger als zwei Monaten und den damit verbundenen starken räumlichen und zeitlichen Konzentrationsschwankungen erschwert.

#### – Kohlenmonoxid

Eine verhältnismäßig gute Datenbasis liegt für das Kohlenmonoxid vor. Dieses Gas wird zu etwa 60 Prozent durch anthropogene Prozesse gebildet und in die Atmosphäre emittiert. Da die anthropogenen Quellen stärker werden, wird ein Anstieg der  $CO$ -Konzentration in der Troposphäre erwartet, der in der Nordhe-

misphäre auch nachgewiesen werden konnte. So zeigen Messungen an der Station Kap Meares in Oregon, USA, einen über den Zeitraum 1979 bis 1987 gemittelten CO-Anstieg von etwas weniger als zwei Prozent pro Jahr (142).

Zu gleichen Ergebnissen kommen Analysen der auf dem Jungfrauoch (Schweiz) gewonnenen spektroskopischen Daten, die auf einen durchschnittlichen Anstieg des atmosphärischen CO für den Zeitraum zwischen 1950 und 1977 von zwei Prozent pro Jahr verweisen (143). Demgegenüber geben Zander

u. a. (144) den Langzeittrend des troposphärischen CO über dem Jungfrauoch für den Zeitraum zwischen 1950/51 und 1985/87 mit  $0,85 \pm 0,2$  Prozent pro Jahr an. Die Ergebnisse von spektroskopischen Messungen von Dianov-Klokov u. a. (145) und Dvoryashina u. a. (146) in Rußland lassen für die Zeit von 1970 bis 1982 auf einen Anstieg des atmosphärischen CO von etwa 1,5 Prozent pro Jahr schließen. Im Gegensatz zur Nordhemisphäre ist auf der Südhemisphäre in den seit 1978 in Cape Point durchgeführten CO-Messungen kein statistisch signifikanter Trend nachzuweisen (147).

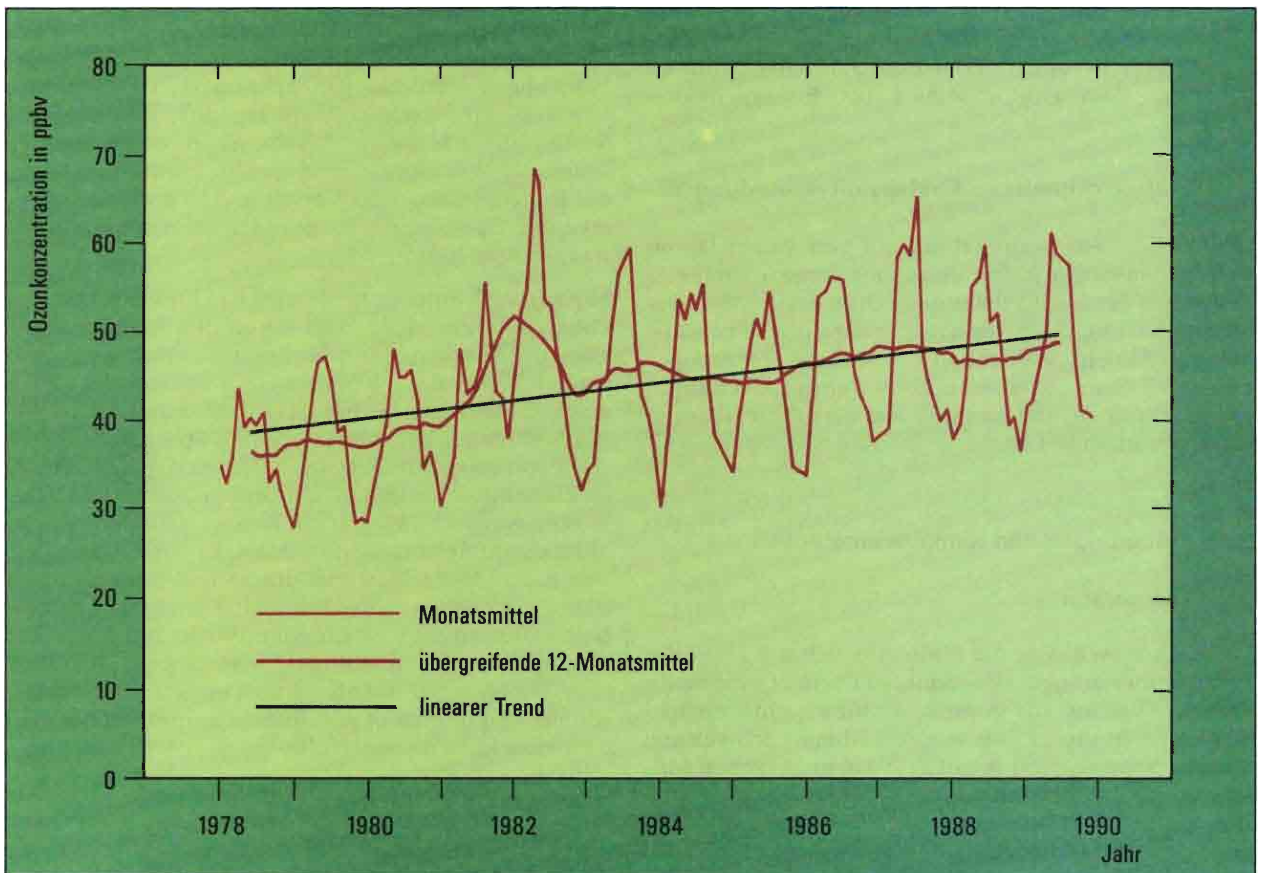


Abb. 11: Zeitlicher Anstieg der  $O_3$ -Konzentration in der freien Troposphäre, gemessen an der Station Zugspitze in 3000 m Höhe. Aufgetragen sind die Monatsmittel der kontinuierlichen  $O_3$ -Registrierung. Die durchgezogene Kurve repräsentiert das zwölfmonatige gleitende Mittel.

### – Stickoxide

Angesichts der großen räumlichen und zeitlichen Variabilität der  $\text{NO}_x$ -Konzentration in der Troposphäre ist die derzeitige Datenbasis völlig unzureichend, um quantitative Aussagen über längerfristige Zeittrends des  $\text{NO}_x$ -Gehaltes der Troposphäre machen zu können. Abschätzungen der zeitlichen Entwicklung der  $\text{NO}_x$ -Quellstärken vergangener Jahrzehnte lassen darauf schließen, daß die troposphärischen  $\text{NO}_x$ -Konzentrationen in diesem Jahrhundert wegen der erheblichen Steigerungen der  $\text{NO}_x$ -Emissionsraten (148) zumindest regional stark zugenommen haben müssen. Diese Vermutung wird durch Analysen von grönländischem Eis bestätigt, die eine Verdopplung des Nitratgehalts innerhalb der vergangenen 20 Jahre zeigen (149), die nur durch eine zunehmende  $\text{NO}_x$ -Konzentration in der Atmosphäre erklärt werden kann. Eine Untersuchung von Gletschereis-Proben aus der Schweiz ergab, daß in der Zeit von der Jahrhundertwende bis in die siebziger Jahre das Nitrat im Eis um einen Faktor von 4 bis 5 angestiegen ist (150).

### – Flüchtige organische Kohlenstoffverbindungen

Wegen der sehr begrenzten Zahl von Daten lassen sich gegenwärtig keine Aussagen über eventuelle Zeittrends der flüchtigen organischen Kohlenstoffverbindungen (VOC) in der Troposphäre machen. Es ist allerdings höchst wahrscheinlich, daß die anthropogenen VOC-Emissionen in diesem Jahrhundert zugenommen haben und deshalb ein Trend zu höheren Werten vorhanden ist.

## 2.2 Änderungen von Klimaparametern

### 2.2.1 Temperatur

Die Klimageschichte der Erde läßt sich mit Hilfe der Isotopenmessungen des Sauerstoffs in Tiefseesedimenten über fast die gesamte Erdgeschichte zurückverfolgen. In dieser Zeit war das Klima nachweislich starken Schwankungen mit Zeitskalen zwischen Millionen von Jahren und wenigen Jahren unterworfen. Besonders betroffen war die zurückliegende Zeitepoche von zwei bis drei Millionen Jahren, die durch wiederholten Wechsel von Warm- und Eiszeiten und einem (relativ zur mittleren Temperatur der Erdgeschichte) ungewöhnlich kühlen Klima geprägt war (vgl. Abbildung 12). In dieser Epoche schwankte die Temperatur der nördlichen Erdhälfte um 5 bis 7°C bei einem Mittelwert von 13°C. Besonders dramatisch verlief die Temperaturänderung am Ausgang der Riß-Kaltzeit, als die Temperatur innerhalb relativ kurzer Zeit von etwa 9°C auf mehr als 16°C oder um 7°C zugenommen hatte. Diese Temperaturschwankungen waren mit erheblichen Auswirkungen auf das Klima verbunden, die sich beispielsweise in der Verteilung von Pollen und Insekten, der zeitlichen Variation der Eisbedeckung sowie der Höhe des Meeresspiegels niederschlugen.

Bemerkenswert ist die Periodizität des in Abbildung 12 wiedergegebenen Temperaturverlaufs und

der damit gekoppelten Glazial-Interglazial-Zyklen, die nach Milankovitch (152) und Berger (153) im wesentlichen auf die natürlichen Schwankungen der astronomischen Elemente der Erdbahn, insbesondere der Neigung der Erdachse, ihrer Präzession und der Exzentrizität der Erdbahn zurückzuführen ist.

Die paläoklimatischen Temperaturschwankungen sind ausschließlich durch natürliche Prozesse verursacht worden. Neben den bereits erwähnten Schwankungen der Erdbahnparameter, die zu einer jahreszeitlichen Schwankung der eingestrahlten Sonnenenergie führen, ist das Klima in der Vergangenheit auch durch die Kontinentaldrift und, als Folge davon, die Veränderung der Meereszirkulation beeinflusst worden. Nicht unwesentlich sind auch Einflüsse auf das Klima durch Vulkanausbrüche, durch die große Menge von Gasen und Staub bis in die Stratosphäre transportiert werden und dort über mehrere Jahre hinweg den Strahlungshaushalt der Erde und damit das Klima stören (modifizieren) können. Ein weiterer möglicher natürlicher Klimaparameter ist die Evolution der terrestrischen Biosphäre, durch die über die letzte Million Jahre hinweg die Wechselwirkung zwischen der Atmosphäre und der Biosphäre und damit die Konzentration und Verteilung mehrerer klimarelevanter Spurengase in der Atmosphäre verändert worden sein kann.

In jüngster Vergangenheit wird das Klima der Erde in zunehmendem Maße auch durch den Menschen gestört. Die Möglichkeiten der Beeinflussung des Klimas sind vielfältig und reichen von industriellen, technologischen Prozessen bis hin zu landwirtschaftlichen Aktivitäten, durch die klimarelevante Spurengase in die Atmosphäre emittiert werden. Durch die Analyse der in Eis eingeschlossenen Luftproben konnte nachgewiesen werden, daß sich die Konzentrationen nahezu aller klimarelevanter Spurengase in der Troposphäre seit der Industrialisierung dramatisch verändert haben. Entsprechend ihrer Klimawirksamkeit hätte deshalb während der vergangenen 100 bis 200 Jahre eine Zunahme der Temperatur erfolgen müssen (zusätzlicher Treibhauseffekt), die sich in einer Änderung des Klimas und der damit zusammenhängenden Parameter bemerkbar machen sollte.

Hinweise auf mögliche Änderungen des Klimas in jüngster Vergangenheit geben die in-situ Messungen der Temperatur, die bereits seit mehreren Jahrhunderten durchgeführt werden, wegen ihrer Ungenauigkeit vielfach aber über große Zeiträume hinweg nicht für die Berechnung von Trends verwendet werden können. Statistisch gesicherte und einigermaßen zuverlässige Aussagen über den zeitlichen Trend der Temperatur in der bodennahen Luftschicht sind erst für die Zeit nach der Mitte des vergangenen Jahrhunderts möglich, in der die Temperaturmessungen den gestellten Anforderungen an die Genauigkeit genügten und das Stationsmeßnetz eine ausreichende Dichte und durch zusätzliche Schiffsbeobachtungen die erforderliche räumliche Verteilung erreicht hatte.

Derzeit liegen drei Datensätze über die globale Temperaturentwicklung der vergangenen 100 bis 150 Jahre vor, die von drei Arbeitsgruppen, und zwar in England (154), in den USA (155) und in der

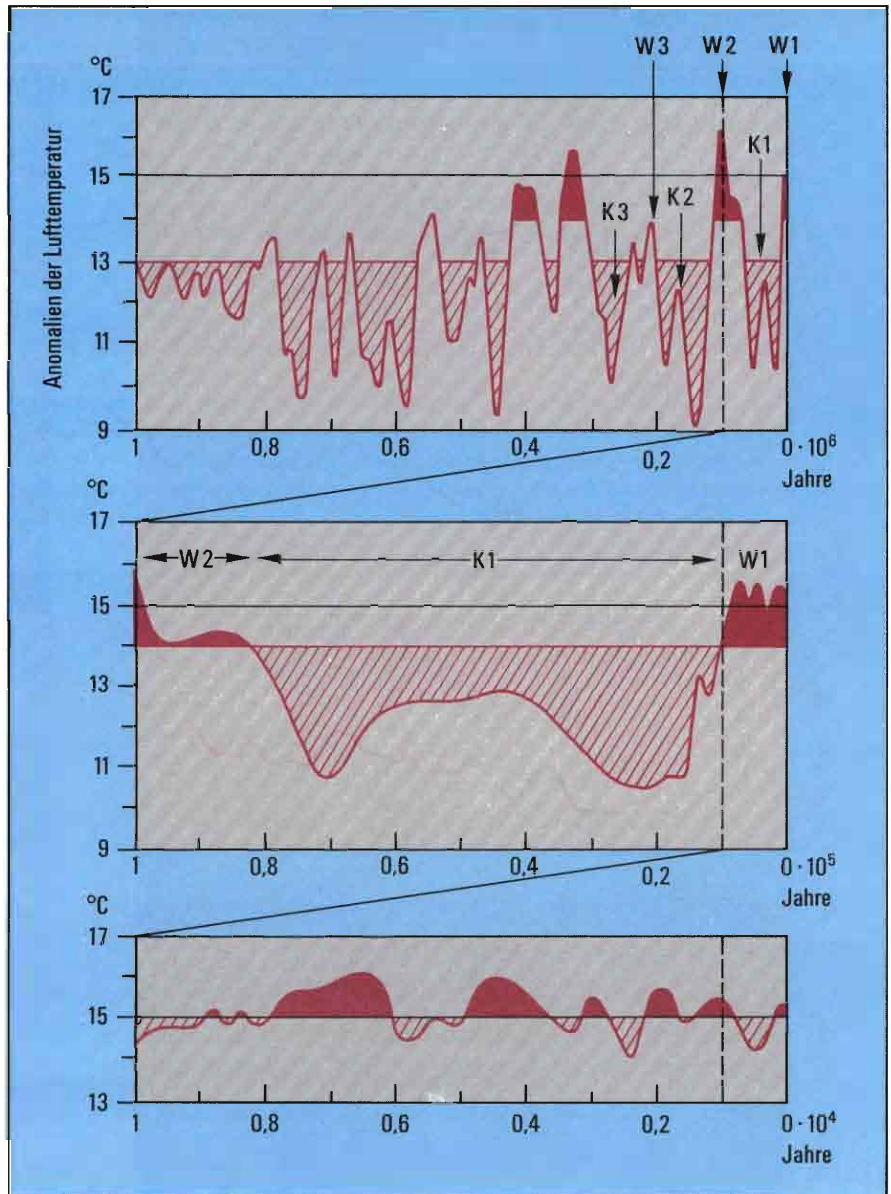


Abb. 12: Paläoklimatische Temperaturvariationen der Nordhemisphäre (151).

Die Temperaturen sind Zehnjahresmittel und enden 1980. Daher wird der jüngste Temperaturanstieg, der in Abb. 13 für globale Mittelwerte dargestellt wird, hier nicht mehr erfaßt. Mit W1, W2 und W3 sind Warmzeiten bezeichnet, mit K1, K2 und K3 Eiszeiten.

UdSSR (156), publiziert worden sind. Diese Datensätze basieren auf den gleichen Temperaturmessungen, sind aber mit unterschiedlichen Analysemethoden und Korrekturanätzen erarbeitet worden. Übereinstimmend verweisen die drei Datensätze auf einen Anstieg der globalen Temperatur in der bodennahen Luftschicht, der in der Zeitspanne von 1881 bis 1989 etwa  $0,5^{\circ}\text{C}$  pro Jahrhundert beträgt (157). Zu diesem Temperaturanstieg trägt die Erwärmung aufgrund des vornehmlich in der Nordhemisphäre wirksamen „Stadtinseleffekts“ lediglich  $0,075^{\circ}\text{C}$  bei (158). Werden die verhältnismäßig unsicheren zwischen 1861 und 1881 gemessenen Temperaturwerte berücksichtigt, reduziert sich dieser Trend lediglich geringfügig.

Interessant ist der beobachtete unterschiedliche Verlauf der Temperaturentwicklung zwischen den He-

mispären, der in Abbildung 13 jeweils getrennt für die beiden Hemisphären dargestellt ist. Während in der Südhemisphäre die Schwankungen von Jahr zu Jahr relativ gering sind und der Temperaturtrend einen nahezu gleichmäßigen Verlauf zeigt, treten in der Nordhemisphäre starke Schwankungen des Temperaturtrends auf, die vielfach abrupt verlaufen und sich in einigen Zeitperioden sogar umkehren. Trotzdem unterscheiden sich die Langzeittrends der über einen Zeitraum von hundert Jahren gemittelten Temperatur beider Hemisphären von etwa  $0,5^{\circ}\text{C}$  nur geringfügig.

Ungewöhnlich starke Temperaturerhöhungen sind in der Nordhemisphäre in den zwanziger Jahren und zuletzt in den achtziger Jahren zu beobachten, in denen die Temperatur im Mittel um mehr als  $0,1^{\circ}\text{C}$  pro Dekade zugenommen hat. Diesem starken Tempera-

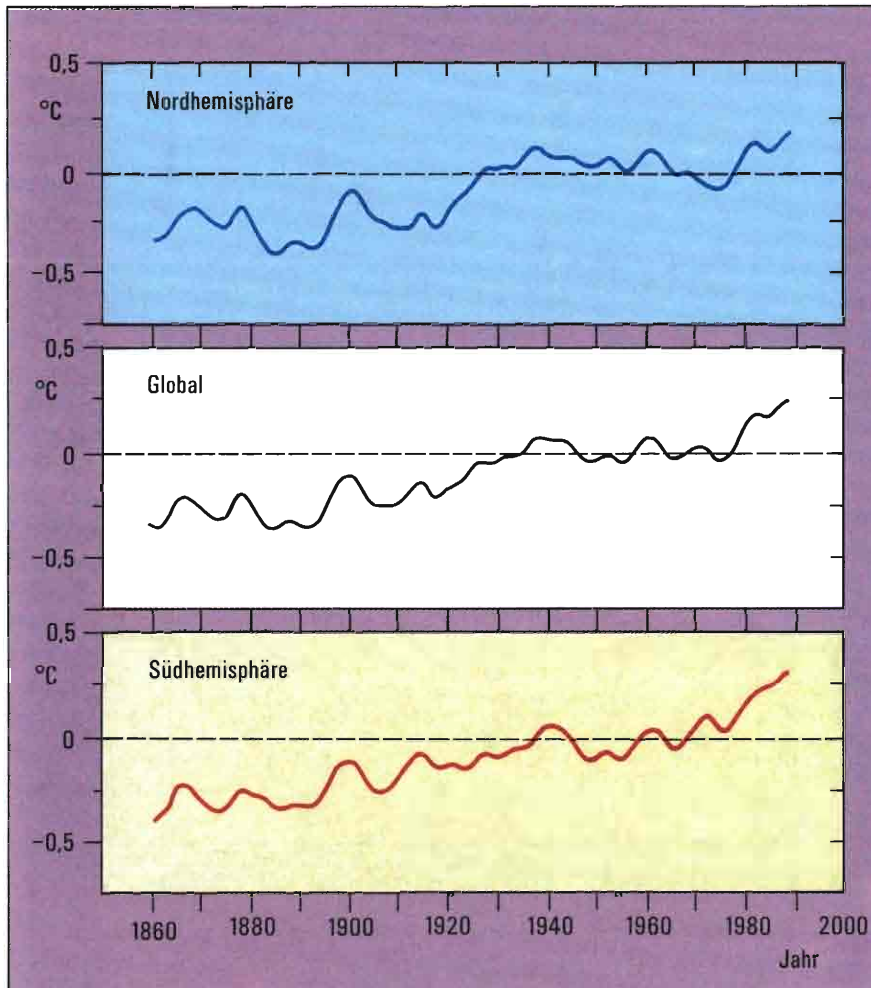


Abb. 13: Anomalien der globalen bodennahen Temperaturen (1861–1988) unter Berücksichtigung der kontinentalen und marinen Daten (159). Als Nulllinie ist der Mittelwert des Zeitabschnittes zwischen 1951 und 1989 gewählt worden.

turanstieg steht eine Abkühlung der bodennahen Luftmassen zwischen 1940 und 1965 von insgesamt etwa  $0,4^{\circ}\text{C}$  gegenüber. Diese starken und auf die Nordhemisphäre beschränkten Temperaturschwankungen werden auf die Einwirkung verschiedener Klimaparameter zurückgeführt, die über den Kontinenten und damit in der Nordhemisphäre besonders ausgeprägt sind.

Trotz der relativ guten Übereinstimmung der bisher publizierten Temperaturtrends sind systematische Fehler nicht ausgeschlossen. Solche systematischen Fehler können durch

- die ungleichmäßige und veränderliche Verteilung der Temperaturmeßstellen beziehungsweise der Schiffsrouten,
- Veränderungen der Landvegetation sowie
- Änderungen der Meßanordnung, einschließlich der Beobachtungszeit, Art der Thermometer und der Höhe der Meßstelle über dem Boden

verursacht worden sein. Für die Korrektur dieser denkbaren Fehler sind verschiedene Ansätze entwick-

kelt worden, deren Zuverlässigkeit teilweise hinreichend geprüft worden ist, so daß nur noch kleinere Korrekturen der bisher publizierten globalen Trends der bodennahen Temperatur zu erwarten sind.

Die Temperaturerhöhung ist stark von der Breite und der Jahreszeit abhängig. Während die Temperaturzunahme in den Tropen und Subtropen nahezu dem globalen Mittelwert entspricht, wird in den hohen nördlichen Breiten nördlich von  $70^{\circ}\text{N}$  eine um mehr als den Faktor 2 höhere Zunahme nachgewiesen (vgl. Abbildung 14). Besonders ausgeprägt ist die Erwärmung in den Wintermonaten, in denen die Temperatur in den vergangenen 100 Jahren im innersten Polargebiet bis zu  $5^{\circ}\text{C}$  zugenommen hat. Aussagen über die Temperaturveränderung in hohen Breiten der Südhemisphäre sind wegen fehlender Daten nicht möglich.

Informationen über die zeitliche Änderung der Temperatur oberhalb der bodennahen Luftschicht bis in Höhen von mehr als 30 km können aus Radiosondennmessungen gewonnen werden. Radiosonden werden derzeit routinemäßig und an einer für die Bestimmung von Trends ausreichend großen Anzahl weltweit ver-



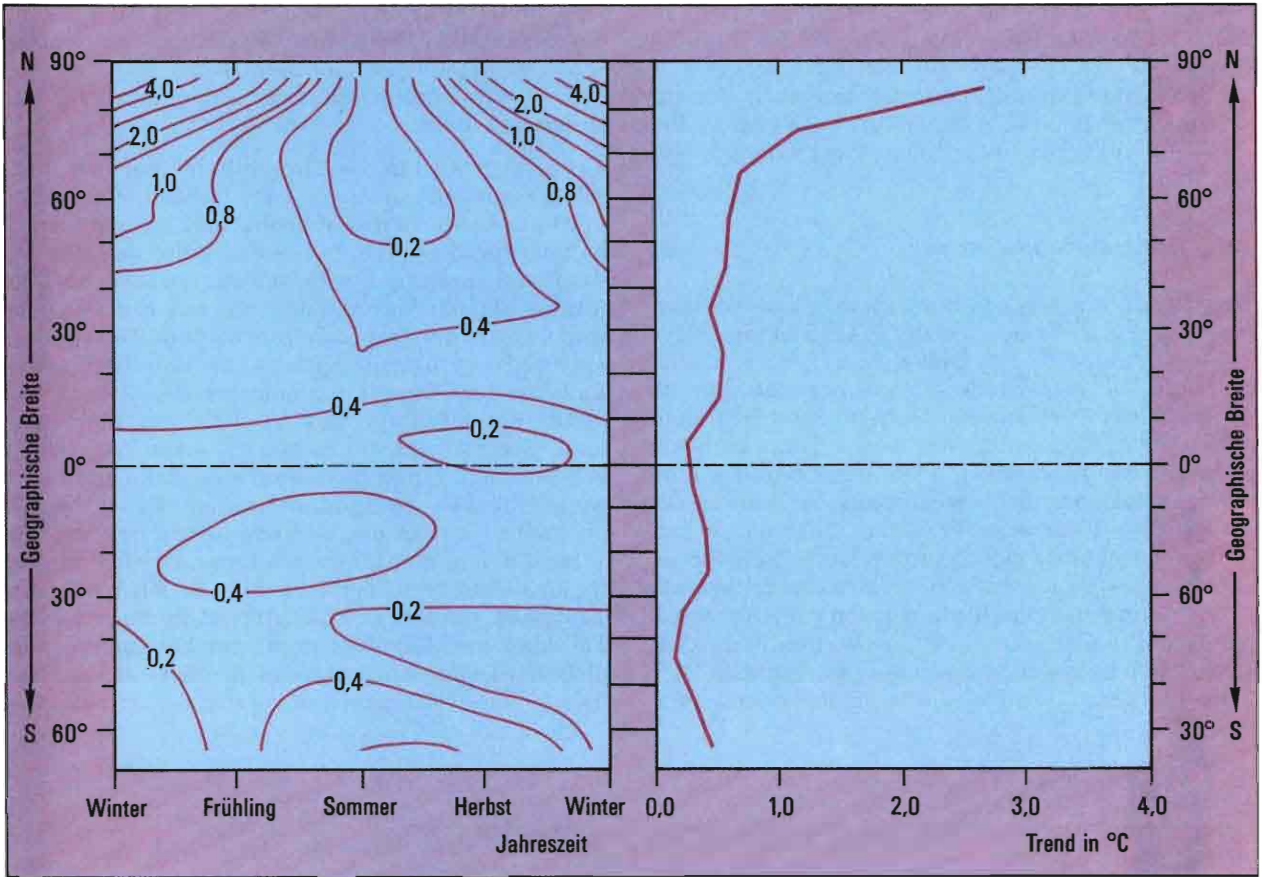


Abb. 14: Lineare Trends der bodennahen Lufttemperatur (1890–1985) (160).  
 Links: Jahreszeitliche und meridionale Aufschlüsselung (Isolinien in °C).  
 Rechts: Jahresmittelwerte in meridionaler Aufschlüsselung.

teilter Stationen zweimal täglich gestartet. Allerdings reicht der Beginn der Radiosondenaufstiege an einigen Stationen nur bis in das „Internationale Geophysikalische Jahr 1958“ zurück, so daß globale Meßdaten über die Temperaturvariationen in der freien Troposphäre und in der Stratosphäre lediglich über die vergangenen 20 bis 30 Jahre vorliegen.

Mit Hilfe dieser Daten sind Temperaturtrends für verschiedene Höhenschichten berechnet worden. Danach zeigt die über die gesamte Troposphäre gemittelte Temperatur einen zeitlichen Trend, der mit einem Minimum Anfang der sechziger Jahre und einem starken Anstieg in den achtziger Jahren dem bereits beschriebenen Temperaturtrend der bodennahen Luftschicht entspricht. Dagegen hat die Temperatur in der unteren Stratosphäre in der vorliegenden Zeitperiode von 30 Jahren um etwa  $0,4^{\circ}\text{C}$  abgenommen (161).

Die beobachtete gegenläufige Entwicklung der Temperaturen in Stratosphäre und Troposphäre verstärkt den negativen vertikalen Temperaturgradienten und bewirkt eine Abnahme der im Mittel stabilen Schichtung der Troposphäre. Daraus resultiert eine Tendenz zu häufigerer Konvektion in der Troposphäre, durch die Wasserdampf in zunehmenden Mengen in größere Höhen der Troposphäre transportiert wird. Es ist nicht auszuschließen, daß damit eine Zunahme des Bedeckungsgrades mit Wolken und eine Verände-

rung der Wolkenart verbunden ist, die sich wiederum auf den Strahlungshaushalt der Erde und dadurch auf das Klima auswirkt (vgl. Nr. 3.3.3).

Offensichtlich bestehen erhebliche Differenzen in der Breitenabhängigkeit des Temperaturtrends zwischen der bodennahen Luftschicht und der freien Troposphäre. Während der Temperaturanstieg in der bodennahen Luftschicht zunächst kaum mit der Breite zunimmt und maximale Werte in Breiten nördlich von  $70^{\circ}\text{N}$  erreicht (vgl. Abbildung 14), treten in der freien Troposphäre die höchsten Erwärmungsraten über den Tropen auf. In diesen Gebieten ist die Temperatur in der mittleren Troposphäre (etwa 5 km Höhe) seit 1965 um etwa  $1^{\circ}\text{C}$  (gegenüber  $0,25^{\circ}\text{C}$  in der bodennahen Luftschicht) angestiegen (162). Über dem Nordatlantik beträgt die Erwärmung während der vergangenen 25 Jahre in der mittleren Troposphäre in Breiten zwischen  $25^{\circ}\text{N}$  und  $50^{\circ}\text{N}$  noch  $0,68^{\circ}\text{C}$ , um dann über  $0,46^{\circ}\text{C}$  in Breiten zwischen  $50^{\circ}\text{N}$  und  $70^{\circ}\text{N}$  auf Werte von  $0,2^{\circ}\text{C}$  über der Polkappe abzusinken. In diesem Fall nimmt die Erwärmung der freien Troposphäre mit zunehmender geographischer Breite ab.

Die unterschiedliche Entwicklung der Temperaturtrends und ihrer Abhängigkeit von der geographischen Breite wird auf die Einwirkung des Wasserdampfes zurückgeführt, der über den Tropen seit Anfang der sechziger Jahre um etwa 20 Prozent zugenommen hat. Wasserdampf ist das wichtigste Treib-

hausgas und hat deshalb einen direkten Einfluß auf den Strahlungshaushalt und das Klima der Erde. Ein höherer Wasserdampfgehalt setzt eine höhere Verdunstungsrate voraus, durch die zusätzlich Verdunstungswärme (latente Wärme) über die Kondensation des Wasserdampfes in der freien Troposphäre freigesetzt wird.

### 2.2.2 Niederschlagstätigkeit

Wegen der direkten Kopplung zwischen der Verdunstungsrate von Wasser und der Wassertemperatur ist bei einer globalen Erwärmung der Erde von einer Veränderung der Niederschlagsintensität und der Niederschlagsverteilung auszugehen. Bei steigender Wassertemperatur wird mehr Wasserdampf in die Atmosphäre emittiert, der dort kondensiert und in Form erhöhter Niederschläge wieder aus der Atmosphäre entfernt wird. Es wird erwartet, daß die Verdunstungsraten insbesondere in den tropischen Ozean-Gebieten stark zunehmen, denn dort sind die Wassertemperaturen der Oberflächen in den vergangenen 20 bis 30 Jahren um etwa  $0,4^{\circ}\text{C}$  gestiegen und haben inzwischen an vielen Stellen Werte von mehr als  $29^{\circ}\text{C}$  erreicht. Dieser Trend ist von besonderer Bedeutung,

weil die Verdunstungsrate exponentiell mit der Temperatur zunimmt, bei hohen Wassertemperaturen also schon ein relativ geringer zusätzlicher Anstieg zu einer überproportionalen Steigerung der Verdunstungsrate führt.

Tatsächlich wird in der Troposphäre über den tropischen Ozeanen ein Anstieg des Gesamt-Wasser-Gehalts um etwa 20 Prozent beobachtet, der auf die Zunahme der Wassertemperatur und der dadurch bedingten Steigerung der Verdunstungsrate zurückgeführt wird (163). Da die mittlere Verweilzeit des Wasserdampfes in der Troposphäre etwa neun Tage beträgt und jedes Wasserdampfmolekül zwischen seiner Emission und Deposition mehrfach den Zyklus zwischen Kondensation und Verdunstung durchläuft, kann der von den tropischen Ozeanen freigesetzte Wasserdampf durch die allgemeine Zirkulation über weite Strecken transportiert werden. Es ist deshalb anzunehmen, daß die Veränderungen der Verdunstungsraten in den tropischen Ozeanen nicht nur die regionale Niederschlagsverteilung in den Tropen beeinflussen, sondern sich auch global auswirken. In der Tat sagen die Modellberechnungen bei Zunahme der globalen Temperatur einen Anstieg der mittleren globalen Niederschlagsmenge voraus, der im Fall einer

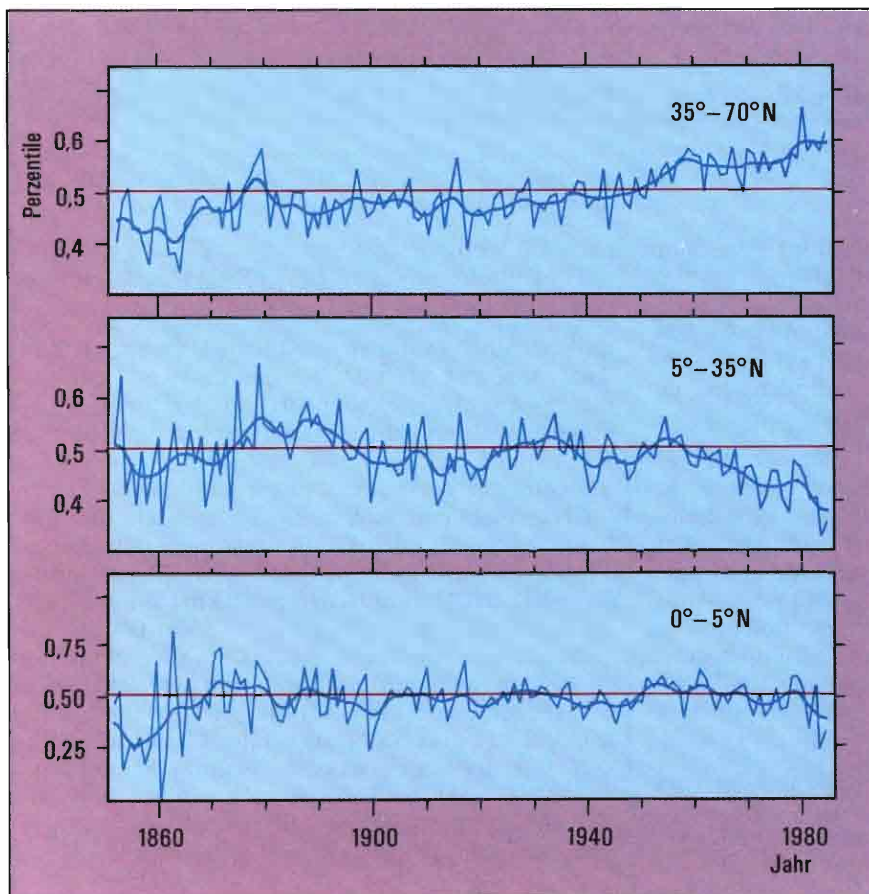


Abb. 15: Langzeittrends des Niederschlags (1855—1985) für die Breiten von  $35-70^{\circ}\text{N}$ ,  $5-35^{\circ}\text{N}$  und  $0-5^{\circ}\text{N}$  (166).

Angegeben ist der Anteil der Stationen mit Niederschlag über oder unter dem Durchschnittswert der rechts von der gestrichelten vertikalen Linie aufgetragenen Zeitreihe.

Verdopplung des CO<sub>2</sub>-Gehalts bis zu elf Prozent, allerdings mit extremen regionalen Unterschieden, beitragen kann (164).

Messungen des Niederschlags werden seit langer Zeit mit einem dichten Meßnetz durchgeführt, das sich vornehmlich auf die Kontinente der Nordhemisphäre konzentriert und durch wenige Inselstationen ergänzt wird. Obwohl diese Messungen bis in die Mitte des vorigen Jahrhunderts zurückreichen, ist die Erfassung statistisch gesicherter globaler und regionaler Niederschlagstrends mit erheblichen Schwierigkeiten verbunden. Besondere Probleme bereiten in diesem Zusammenhang die starke räumliche und zeitliche Variabilität der Niederschläge, die zeitlichen Veränderungen an oder in der Umgebung der Meßstellen sowie die unzulängliche Genauigkeit der für die Niederschlagsmessungen eingesetzten Regenwassersammler. Es ist bekannt, daß die Regenwassersammler stark voneinander abweichen und die Abweichungen in der Regel noch von der Art des Niederschlags abhängig sind. Spezielle Probleme bereitet die Messung des als Schnee fallenden Niederschlags, der von den herkömmlichen Sammlern nur teilweise erfaßt wird. Vielfach sind Regenwassersammler während der Meßperiode ohne vorherige Überprüfung der Sammeleffizienz ausgetauscht worden, so daß quantitative Aussagen über Langzeittrends der Niederschlagsverteilung an diesen Stationen kaum möglich sind.

In Anbetracht dieser Probleme sind die aus den Stationsmessungen abgeleiteten langfristigen Trends des Niederschlags mit erheblichen Unsicherheiten behaftet und lassen lediglich qualitative Rückschlüsse zu. Eine Kontrolle der auf diese Weise bestimmten Niederschlagstrends ist durch den Vergleich mit anderen beobachteten Parametern des Wasserkreislaufs, so unter anderem der zeitlichen Variation des Wasserstands von Seen und des Wasserabflusses größerer Flüsse, möglich.

Mehrere Arbeitsgruppen (165) haben in jüngster Zeit die vorhandenen Niederschlagsdaten analysiert und daraus die Niederschlagstrends größerer Regionen der Nordhemisphäre bestimmt. Für diese Analysen wurde eine große Anzahl von Stationen ausgewählt, die über relativ zuverlässige und langfristige Datenreihen verfügen. Die Ergebnisse deuten darauf hin, daß die Niederschlagsverteilung in den vergangenen 100 Jahren langfristigen Trends unterworfen ist, die im wesentlichen erst während der vergangenen Jahrzehnte aufgetreten und stark breitenabhängig sind. Während der Niederschlag in den mittleren und hohen Breiten der Nordhemisphäre (nördlich von 35°N) und in der gesamten Südhemisphäre in jüngster Zeit allgemein zugenommen hat, wird in den subtropischen Breiten der Nordhemisphäre (5–35°N) eine Abnahme der Niederschlagsmenge beobachtet (vgl. Abbildung 15). Besonders betroffen ist die südlich der Sahara gelegene Sahel-Zone, in der sich die Wüstengebiete in den vergangenen Jahrzehnten ausgedehnt haben, was zu schweren sozialen und ökonomischen Problemen für die in diesem Gebiet lebende Bevölkerung geführt hat.

Der Trend der Niederschlagsverteilung zeigt stark regional unterschiedliche Entwicklungen, die erheblich

von dem über den betreffenden Breitengürtel gemittelten Wert abweichen. So hat der Niederschlag in Europa seit Mitte dieses Jahrhunderts geringfügig zugenommen. Steigende Trends werden vor allem im Winter mit einem Maximum im Südwesten Europas beobachtet, dem ein ausgeprägter Rückgang der Niederschläge im Sommer im Südosten Europas gegenübersteht (167).

Dagegen ist in der Sowjetunion ein bemerkenswerter gradueller Anstieg der Niederschläge seit 1880 zu beobachten, der im wesentlichen auf die Niederschlagszunahme im Winter, Frühjahr und Herbst zurückzuführen ist (168). Im Sommer war dagegen kein signifikanter Trend festzustellen. Eine Zunahme des Niederschlags ist auch in den USA für den Zeitraum nach 1950 zu verzeichnen. Im gleichen Zeitraum hat der Niederschlag in Nordafrika stark sowie in Südostasien leicht abgenommen. Änderungen der Niederschläge sind auch in Australien (169) sowie in Indien beobachtet worden, in denen seit 1965 in zunehmendem Maße Dürreperioden auftreten (170).

Unklar ist derzeit, ob und in welchem Umfang sich die Niederschläge in den polaren Gebieten geändert haben. Diese Fragestellung ist von besonderer Bedeutung, weil Veränderungen der Eismassen wegen ihrer langen Lebenszeit und der damit verbundenen hohen Speicherkapazität für Wasser einen erheblichen Einfluß auf die Veränderung des Meeresspiegels haben können. Es sind zwar in den zurückliegenden Jahren wiederholt Versuche unternommen worden, die Massenbilanz der arktischen und antarktischen Eismassen abzuschätzen und daraus die Änderungen des Niederschlags in polaren Gebieten zu berechnen. Allerdings sind die Ausgangsdaten noch zu ungenau, um quantitative beziehungsweise statistisch gesicherte Angaben machen zu können. Kürzlich publizierte Satellitenmessungen weisen auf eine Zunahme der Mächtigkeit des südlichen grönländischen Eisschildes um etwa 20 cm pro Jahr hin (171), die auf eine Zunahme des Niederschlags über dem südlichen Teil Grönlands schließen lassen. Diese Daten beziehen sich allerdings nur auf eine relativ kurze Zeit von zehn Jahren und lassen demnach keine Aussagen über Langzeittrends zu.

Unbekannt ist ebenfalls, ob und in welchem Umfang sich die Frequenz und die Struktur der Niederschläge verändert haben. Diese Parameter haben Einfluß auf die Art und die Verteilung der Biosphäre über den Kontinenten, so daß bereits geringe Änderungen der Niederschlagshäufigkeit und der Niederschlagsintensität bei gleicher Gesamtmenge zu großen ökologischen Auswirkungen führen können. Betroffen ist davon auch die Landwirtschaft.

### 2.3.3 Meeresspiegel

Der Meeresspiegel war während der zurückliegenden prähistorischen Zeit aufgrund natürlicher klimatischer Veränderungen schon immer starken Schwankungen unterworfen, die in geologischen Zeitmaßstäben oft rasch abliefen (172). Während der vergangenen großen Eiszeit, als Nord-Europa größtenteils von einer dicken Eisschicht bedeckt war, lag der Meeresspiegel um etwa 120 m unter dem derzeitigen Niveau.

Diese Schwankung ist im wesentlichen auf drei Prozesse zurückzuführen, und zwar (a) auf Änderungen der Landeismassen, (b) auf Veränderungen der Temperatur des Ozeanwassers und der damit verbundenen thermischen Ausdehnung des Wassers sowie (c) auf Veränderungen der auf den Kontinenten als Grundwasser oder Oberflächenwasser gespeicherten Wassermassen. Da mindestens zwei dieser Prozesse sehr stark vom Klima abhängig sind, ist ein Anstieg des Meeresspiegels wegen des seit der Industrialisierung beobachteten Temperaturtrends in der bodennahen Luftschicht von  $0,7^{\circ}\text{C}$  sehr wahrscheinlich, sollte aber wegen der relativ langen Ansprechzeiten dieser Prozesse bei klimatischen Veränderungen gegenüber dem Temperaturanstieg zeitlich erheblich verzögert sein. Der möglichen Veränderung des Meeresspiegels ist im Zusammenhang mit der Diskussion des zusätzlichen Treibhauseffekts in jüngster Zeit besondere Aufmerksamkeit geschenkt worden, da viele der dicht besiedelten Gebiete der Erde nur unwesentlich über

dem Meeresniveau liegen und deshalb schon geringe Erhöhungen des Meeresspiegels zu erheblichen sozio-ökonomischen Problemen führen können.

Messungen des Meeresspiegels gehen bis mindestens auf das Jahr 1808 zurück, als in Brest (Frankreich) mit routinemäßigen Pegelmessungen begonnen wurde. Inzwischen hat sich die Anzahl der Pegelmeßstationen auf insgesamt 1300 erhöht, die aber in der Regel im Bereich der Küstenlinien liegen und deshalb nicht in allen Fällen Änderungen des Meeresspiegels repräsentativ wiedergeben. Die vorliegenden Ergebnisse sind in den vergangenen Jahren von verschiedenen Arbeitsgruppen auf einen möglichen Anstieg des Meeresspiegels hin analysiert worden, wobei nur solche Daten verwendet wurden, die an Stationen mit einer möglichst langen und gleichmäßigen Meßperiode von mindestens 30 Jahren und der notwendigen Meßgenauigkeit gewonnen wurden.

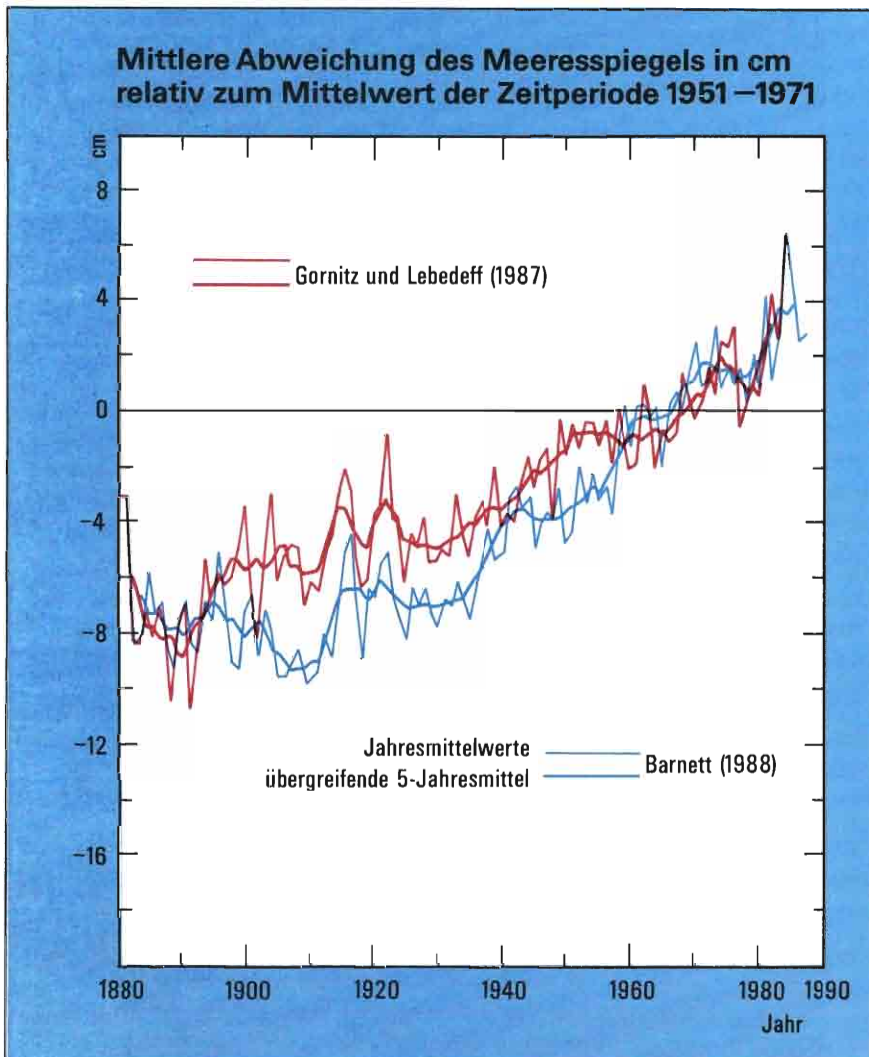


Abb. 16: Zeitreihe des Jahresmittelwertes des globalen Meeresspiegels (178). Der Meeresspiegel ist relativ zum Mittelwert der Zeitperiode 1951 bis 1970 aufgetragen. Die durchgezogene Linie repräsentiert das laufende Fünfjahresmittel.

Insgesamt weisen die Abschätzungen auf einen globalen Anstieg des Meeresspiegels während der vergangenen 80 bis 100 Jahre hin, der im Mittel zwischen 0,5 und 3 mm pro Jahr beträgt. Die neueren Abschätzungen von Gornitz und Lebedeff (173), Barnett (174) sowie Peltier und Tushingham (175) engen diesen Schwankungsbereich auf Werte von 1,0 bis 1,2 mm pro Jahr für den Zeitraum von 1880 bis Mitte der achtziger Jahre des 20. Jahrhunderts beziehungsweise  $2,4 \pm 0,9$  mm pro Jahr für die Periode zwischen 1920 und 1970 ein. Der von Gornitz und Lebedeff (176) und von Barnett (177) berechnete zeitliche Trend des Meeresspiegelanstiegs ist in Abbildung 16 zusammengefaßt. Obwohl die von diesen Autoren über die vergangenen 100 Jahre gemittelten Trends gut übereinstimmen, zeigen die zeitlichen Verläufe des Anstiegs erhebliche Differenzen, besonders auffallend in der Zeitperiode zwischen 1880 und 1930. Diese Differenzen machen die weiterhin bestehenden Unsicherheiten der Trendanalysen des Meeresspiegelanstiegs deutlich.

Diese Unsicherheiten sind auf den Einfluß mehrerer Faktoren zurückzuführen. Diese Faktoren sind die Länge der gewählten Beobachtungsperiode, die Auswahl und Anzahl der Stationen einschließlich ihrer geographischen Verteilung, aber auch Unterschiede in den Analyseverfahren sowie voneinander abweichende Korrekturverfahren für die im Küstenbereich an vielen Stellen beobachteten vertikalen Bewegungen der Landmassen.

Der Anstieg des Meeresspiegels war nicht überall gleich stark. Es sind erhebliche regionale Differenzen beobachtet worden, die auf unterschiedliche regionale Änderungen meteorologischer Parameter (unter anderem des Luftdrucks, der Windgeschwindigkeit und der Windrichtung in Bodennähe), Änderungen von Meeresströmungen und unterschiedliche großflächige Hebungen beziehungsweise Senkungen der Landmassen (infolge tektonischer Bewegungen) zurückzuführen sind. So steht dem globalen mittleren Anstieg des Meeresspiegels ein Absinken des Meeresspiegels im asiatischen Teil des Pazifiks gegenüber, das sehr wahrscheinlich durch die tektonischen Vorgänge im Bereich des Himalaja verursacht wird. Bemerkenswert sind auch die im Nordatlantik beobachteten Unterschiede im Trend des Meeresspiegels: Er ist in den vergangenen 100 Jahren im östlichen Teil mit einer durchschnittlichen Rate von 3 mm pro Jahr, im westlichen Teil dagegen mit nur einer Rate von 1 mm pro Jahr angestiegen.

Auch wenn die bisher veröffentlichten Trend-Abschätzungen des Meeresspiegels recht gut übereinstimmen, ist nicht auszuschließen, daß sie erhebliche systematische Fehler aufweisen. Solche Fehler können durch die ungleichmäßige geographische Verteilung der Pegelmeßstationen verursacht worden sein, deren Anzahl sich heute im wesentlichen auf den Küstenbereich Europas, Nordamerikas und Japans konzentriert, während große Teile Afrikas und insbesondere die südhemisphärischen Ozeane völlig unterrepräsentiert sind. Bis etwa in die zwanziger Jahre hinein waren die Pegelstationen sogar nahezu ausschließlich auf den Nordatlantik beschränkt, so daß Aussagen über den globalen Anstieg des Meeresspiegels vor diesem Zeitraum kaum möglich sind.

Eine weitere wichtige Fehlerquelle liegt darin, daß die meisten Pegelstationen im Küstenbereich von Kontinenten installiert sind, wo sie von großflächigen Hebungen beziehungsweise Senkungen der Landmassen aufgrund tektonischer Vorgänge unmittelbar betroffen sind. Es wird von verschiedenen Arbeitsgruppen zwar der Versuch unternommen, den Einfluß derartiger tektonischer Vorgänge auf die Pegelmessungen durch Modellbetrachtungen zu korrigieren, doch ist die Genauigkeit dieser Korrekturen zur Zeit noch nicht abschätzbar, so daß ein noch immer erheblicher Unsicherheitsbereich bestehen bleibt. Probleme bereiten ebenfalls lokale Prozesse, so unter anderem die Sedimentation, die Förderung von Öl und Erdgas und die Grundwasserabsenkung, die insgesamt zu einer Veränderung des Pegelstands führen können. Eine weitere wesentliche Störgröße ist die isostatische Ausgleichsbewegung der Landmassen in mittleren und höheren Breiten aufgrund der Entlastung von den Eismassen der vergangenen Eiszeit.

Der in den vergangenen 100 Jahren beobachtete Anstieg des Meeresspiegels ist im wesentlichen zurückzuführen auf

- die thermische Ausdehnung des Wassers der Ozeane, vor allem in der 50 bis 500 m dicken Mischungsschicht,
- die Volumenveränderung des in Seen und Grundwasser gespeicherten Wassers und
- das Abtauen der Gebirgsgletscher.

Nach dem heutigen Kenntnisstand tragen die thermische Ausdehnung mit etwa  $0,4 \pm 0,2$  mm pro Jahr (179), die Volumenänderung des auf den Kontinenten gespeicherten Wassers mit weniger als 0,2 mm pro Jahr (180) und das Abschmelzen von Gletschern mit etwa  $0,5 \pm 0,3$  mm pro Jahr (181) zum beobachteten Anstieg des Meeresspiegels bei.

Im Gegensatz zu den Gebirgsgletschern, bei denen ein Schwund nachgewiesen ist, könnte das Volumen der grönländischen und antarktischen Eismasse zunehmen. Diese denkbare Zunahme wird damit erklärt, daß mit ansteigender Temperatur die Niederschläge über Grönland und der Antarktis zunehmen und das gleichzeitig stärker gewordene Abschmelzen der Eismassen überkompensieren könnten. Dies könnte zu einer Akkumulation der Niederschläge in Form von Eis führen. In der Tat weisen Satellitendaten auf eine Zunahme der Dicke des südlichen Teils des Grönlandeises hin, die bei Extrapolation auf das gesamte grönländische Inlandeis einem Meeresspiegelrückgang von  $0,45 \pm 25$  mm pro Jahr während der vergangenen Dekade entsprechen würde (182). Jedoch ist von verschiedenen Autoren die zur Abschätzung der Volumenänderung des Grönlandeises notwendige Genauigkeit der Messungen angezweifelt und darauf hingewiesen worden, daß lediglich ein Teil des Grönlandeises meßtechnisch erfaßt worden ist, so daß die von Zwally (183) für das gesamte Grönlandeis angegebene Akkumulationsrate noch verhältnismäßig unsicher ist.

Den Ergebnissen der Satellitenbeobachtungen stehen Beobachtungen eines allgemeinen Rückzugs der Gletscherzungen in Grönland (184) gegenüber, der durch die in Grönland in den vergangenen 100 Jahren

beobachtete Temperaturzunahme und der damit verbundenen Abschmelzrate erklärt wird und dadurch zum Anstieg des globalen Meeresspiegels mit etwa  $0,23 \pm 0,16$  mm pro Jahr beigetragen haben kann.

### 2.2.4 Atmosphärische Zirkulation

Die Zirkulation der Atmosphäre ist eine Folge der unterschiedlichen Bestrahlung der Erde durch die Sonne. Windgeschwindigkeit und Windrichtung werden durch das Luftdruckfeld gut beschrieben, das von den meteorologischen Diensten aller der WMO (World Meteorological Organisation) angeschlossenen Länder seit Anfang der vierziger Jahre routinemäßig analysiert wird. Die daraus resultierenden Daten werden in der Regel für Höhen einer Fläche konstanten Druckes, das heißt in den sogenannten Hauptisobarenflächen (zum Beispiel bei 1 000 hPa, 850 hPa und 500 hPa), angegeben. Sie bieten damit eine gute Übersicht über die globale Druckverteilung, aus der der isobarenparallele geostrophische Wind in guter Annäherung an den wahren Wind unmittelbar abgeleitet werden kann. Dem mittleren globalen Windfeld sind noch regionale Effekte überlagert, die das regionale Windfeld in einem erheblichen Umfang mitbestimmen und aufgrund der direkten Kopplung zwischen der Windrichtung und anderen Klimafaktoren (unter anderem der Temperatur und der Niederschlagsverteilung) das regionale Klima entscheidend beeinflussen können.

Eine typische, durch regionale Effekte ausgelöste Anomalie der atmosphärischen Zirkulation ist die „El Niño/Southern Oscillation (ENSO)“, deren Merkmal ungewöhnlich warmes Oberflächenwasser im östlichen tropischen Pazifik ist und die vor der peruanischen Küste um die Weihnachtszeit (El Niño = Christkind) einsetzt (185). Diese Anomalie führt zu einer signifikanten Änderung der Druckverteilung im gesamten tropischen und teilweise subtropischen Pazifik. Die Änderung beeinflusst vor allem in den Wintermonaten auch die höheren Breiten der Nordhemisphäre und verursacht dort eine Änderung der Zugbahn von Tiefdruckgebieten, die wiederum andere Klimaparameter (wie Temperatur und Niederschlagsverteilung) modifiziert. Die „El Niño/Southern Oscillation“ hat große Auswirkungen auf die Niederschlagsverteilung im gesamten tropischen Bereich, insbesondere im indonesischen Raum (186). Das El Niño-Ereignis ist ein natürliches Phänomen, das in regelmäßigen Abständen von 3 bis 10 Jahren auftritt. Inwieweit die in den vergangenen 100 Jahren beobachtete globale Erwärmung der Erdatmosphäre einen Einfluß auf Frequenz und Intensität des „El Niño“ hatte, ist zur Zeit nicht bekannt. Ein Einfluß ist nicht auszuschließen.

Dagegen scheinen direkte Zusammenhänge zwischen der Erhöhung der globalen Temperatur und der atmosphärischen Zirkulation im nordatlantischen und nordpazifischen Raum zu bestehen, in denen sich die Druckverteilung und damit auch die Windverhältnisse in den vergangenen Dekaden nachweislich erheblich verändert haben. Nach Flohn (187) haben sich die Lage und der Druck des – die Zirkulation des nordatlantischen und europäischen Raums beeinflus-

senden – Azorenhochs und Islandtiefs seit 1965 markant und jahreszeitlich unterschiedlich geändert. In dieser Zeit hat sich das Azorenhoch im Jahresmittel in Richtung Spanien verschoben, während sich das Islandtief geringfügig nach Westen verlagert hat. Dadurch hat das Druckgefälle längs des vierzigsten Längengrades um etwa 30 Prozent zugenommen. Das Druckgefälle zwischen Ungarn und dem Kern des Islandtiefs hat sich ebenfalls verändert, wodurch sich der mittlere geostrophische Wind von West in Richtung Südwest gedreht hat. Diese Veränderungen verstärken den Temperaturkontrast und führen damit zu höheren Windgeschwindigkeiten in diesen Gebieten (188).

Durch Analysen von Radiosondenaufstiegen, die an ausgewählten nordatlantischen Stationen durchgeführt wurden, konnte eine statistisch gesicherte Zunahme der Windgeschwindigkeit in 5 km Höhe für die zurückliegenden 30 Jahre nachgewiesen werden. Die Zunahme wird vornehmlich in den Wintermonaten (November bis März) beobachtet, in der die Westkomponente des Windes je nach Beobachtungsstation um 30 bis 50 Prozent stärker geworden ist.

Eine verstärkte Tiefdruckbildung wird im Winter auch im nordpazifischen Raum beobachtet. In den vergangenen 30 Jahren hat der Kerndruck des Aläutentiefs um 11 hPa abgenommen (189), wodurch es sich im Vergleich zum Islandtief noch weiter verstärkt hat. Dieses unterschiedliche Verhalten wird von Flohn (190) mit der stärkeren Verdunstung über dem tropischen Westpazifik erklärt. In diesem Teil des Pazifiks tritt die höchste Wassertemperatur von mehr als 29°C auf, so daß bereits geringfügige Temperaturerhöhungen zu einer starken Zunahme des Wasserdampftransports in die Atmosphäre führen.

### 2.2.5 Extreme Wetterereignisse

Da die der Verdunstungsrate mit der Wassertemperatur gekoppelt ist, wird durch die Zunahme der globalen Temperatur zusätzlich Wasserdampf aus den Ozeanen in die Atmosphäre abgegeben, der dort kondensiert und als Niederschlag wieder ausfällt. Bei der Kondensation des Wasserdampfes wird die zur Verdunstung aufgewandte Energie in Form von Wärme in der Troposphäre freigesetzt. Diese vom Ozean über den Wasserdampf in die Atmosphäre abgegebene Energie ist nach Flohn (191) durch den beobachteten Anstieg der Temperatur der tropischen Ozeane auf 8 bis 10 Watt pro Quadratmeter angewachsen. Diese zusätzliche Energiezufuhr ist damit erheblich größer als die Störung durch den zusätzlichen Treibhauseffekt. Die Differenz zeigt die Bedeutung des Wasserkreislaufs für das Klima.

Die in Form von Wasserdampf gespeicherte Energie (latente Wärme) wird in der Regel in räumlich begrenzten Wettersystemen freigesetzt. Da die latente Wärme außerdem noch relativ rasch freigesetzt wird, kann die Zunahme der globalen Verdunstungsrate regionale Wettersysteme, beispielsweise Tiefdruckgebiete und Gewitter, erheblich verstärken und bei zunehmender Windgeschwindigkeit eine Häufung extremer meteorologischer Ereignisse verursachen. Dies gilt insbesondere für die tropischen Wirbel-

stürme, die ihre Energie fast ausnahmslos aus der Verdunstung der warmen tropischen Ozeane beziehen. Ob sich die Häufigkeit und die Zugbahnen der Wirbelstürme in den vergangenen Jahren unter anderem durch die globale Temperaturzunahme signifikant geändert haben, läßt sich wegen der relativ kurzen Beobachtungszeit und der bisher mangelhaften Dichte von Beobachtungsstationen in den marinen tropischen Gebieten derzeit nicht beurteilen.

Besonderes öffentliches Interesse haben in Europa die im Winter 1989/90 häufiger als üblich über Europa hinwegziehenden Orkantiefs erregt, die zahlreiche Menschenleben gekostet und Versicherungsschäden in Höhe von etwa 15 Milliarden DM verursacht haben. Häufigkeit und Intensität der Stürme wurden durch den gegenüber den normalen Werten um 20 bis 27 hPa niedrigeren Druck des Islandtiefs verursacht, was zu einer Verstärkung des Druckgradienten über dem Nordatlantik führte. Diese ungewöhnliche Anomalie des Wetters reiht sich in die in den vergangenen Jahren beobachtete Zunahme der Sturmhäufigkeiten in Südengland sowie im niederländischen/norddeutschen Bereich ein (192).

Trotzdem ist zur Zeit nicht sicher, ob diese Zunahme mit dem zusätzlichen Treibhauseffekt in Verbindung steht oder nur Teil einer natürlichen Klimavariabilität darstellt. Immerhin ist gegen Ende des vergangenen Jahrhunderts eine ähnliche Häufung der Sturmereignisse aufgetreten, die nicht durch anthropogene Einflüsse hervorgerufen worden sein kann und bis etwa Mitte der siebziger Jahre dieses Jahrhunderts trotz der globalen Erwärmung wieder zurückgegangen ist. Ausschließen läßt sich ein direkter Zusammenhang zwischen dem Treibhauseffekt und der Zunahme der Sturmhäufigkeit aber auch nicht.

Ein weiteres interessantes Ereignis, das sich in die Reihe der ungewöhnlichen Wetteranomalien einreicht, ist die in den vergangenen Jahren in Europa beobachtete milde Witterung während der Wintermonate, die im Alpenbereich zudem mit einer Abnahme der Niederschläge verbunden war. Diese Temperaturanomalie ist im süddeutschen Raum durch Messungen an Bergstationen, so unter anderem am Observatorium Hohenpeißenberg sowie der Meßstation Wank, belegt. Danach lag die im Winter 1989/90 am Hohenpeißenberg (etwa 980 m Höhe) beobachtete Temperatur mit einem Mittelwert von etwa 3°C um etwa 4°C über dem langjährigen Mittel. Eine ähnliche Anomalie wurde am Wank (1 780 m Höhe) beobachtet, wo in diesem Winter die von November bis Februar gemittelten Temperaturwerte bei 0,9°C lagen und damit das 18jährige Mittel um etwa 3°C überstiegen.

Auch die Bauer'sche Temperaturreihe, die einen Mittelwert für ganz Mitteleuropa darstellt und bis 1761 zurückreicht, zeigt, daß der vergangene Winter mit einer Anomalie von +3,7°C der mildeste seit Beginn der Wetteraufzeichnungen war. Auch das ganze vergangene Jahr war 1,7°C zu warm und damit das wärmste dieses ganzen Zeitraumes. Die ersten sechs Monate von 1990 waren mit einer Abweichung vom Mittelwert von +2,3°C noch erheblich wärmer.

### 3. Der Strahlungshaushalt und seine Beeinflussung durch den Menschen

#### 3.1 Der Strahlungshaushalt des Systems Erde-Atmosphäre

Die Atmosphäre und die Erdoberfläche werden durch die von der Sonne kommende elektromagnetische Strahlung erwärmt. Gleichzeitig senden die Erdoberfläche sowie die in der Atmosphäre enthaltenen Gase aufgrund ihrer Temperatur ebenfalls elektromagnetische Strahlung im sogenannten Wärmestrahlungsbereich in den Weltraum aus. Unterscheiden sich Einstrahlung und Ausstrahlung, muß das System Erde-Atmosphäre seine mittlere Temperatur ändern, das heißt bei größerer Einstrahlung oder geringerer Ausstrahlung würde die Temperatur zunehmen.

Im langzeitigen Mittel ist der Strahlungshaushalt des Systems Erde-Atmosphäre ausgeglichen. Abbildung 17 zeigt diesen Sachverhalt in relativen Einheiten bezogen auf die am Oberrand der Atmosphäre einfallende Sonnenstrahlung (=100). Davon werden etwa 30 Prozent in das Weltall zurückgestreut, so daß lediglich 70 Prozent der Sonnenenergie absorbiert und diese durch Ausstrahlung im infraroten Spektralbereich oder Wärmestrahlungsbereich wieder ausgeglichen werden.

Von den im System Erde-Atmosphäre verbleibenden 70 Prozent der einfallenden Sonnenstrahlung werden 51 Prozent an der Erdoberfläche absorbiert und in Wärme umgewandelt. Somit wird an der Erdoberfläche mehr Energie umgesetzt als in der gesamten Atmosphäre (19 Prozent Absorption, überwiegend durch Gase und vergleichsweise wenig durch Wolken). Dieser Energiegewinn an der Erdoberfläche wird nur zum Teil (zu 19 Prozent) durch die terrestrische Ausstrahlung, das heißt Abstrahlung von Wärme, ausgeglichen, so daß hier ein Nettogewinn von 32 Prozent zu beobachten ist, der durch den direkten Wärmetransport (fühlbare Wärme) oder über die Verdunstung von Wasser (latente Wärme) ausgeglichen wird.

Betrachtet man die Strahlungsbilanz der Atmosphäre für sich allein, so ist netto ein Energieverlust durch Strahlungsvorgänge von 32 Prozent der einfallenden Sonnenstrahlung festzustellen. Hier steht nämlich dem genannten Energiegewinn von 19 Prozent im Spektrum der einfallenden Sonnenstrahlung ein Energieverlust von 51 Prozent im infraroten Spektrum gegenüber. Dieser Energieverlust muß durch andere Wärmetransporte von der Erdoberfläche her ausgeglichen werden, wobei der Fluß latenter Wärme mit 27 Prozent den Hauptanteil trägt. Nur die verbleibenden 5 Prozent werden durch den Transport fühlbarer Wärme in die untere Atmosphäre beigesteuert. Diese beiden Wärmetransporte sind in der Abbildung 17 ganz rechts eingezeichnet.

Beim Fluß latenter Wärme wird Wasserdampf in die freie Atmosphäre transportiert. Dieser kondensiert dort und bildet Wolken und Niederschlag. Während die bei der Kondensation des Wasserdampfs freigeordnete Energie bei der Wolkenauflösung (Verdunstung der Wolkentropfchen) wieder verbraucht wird, kann in der Atmosphäre dann ein Energiegewinn verbucht werden, wenn der Niederschlag ausfällt und

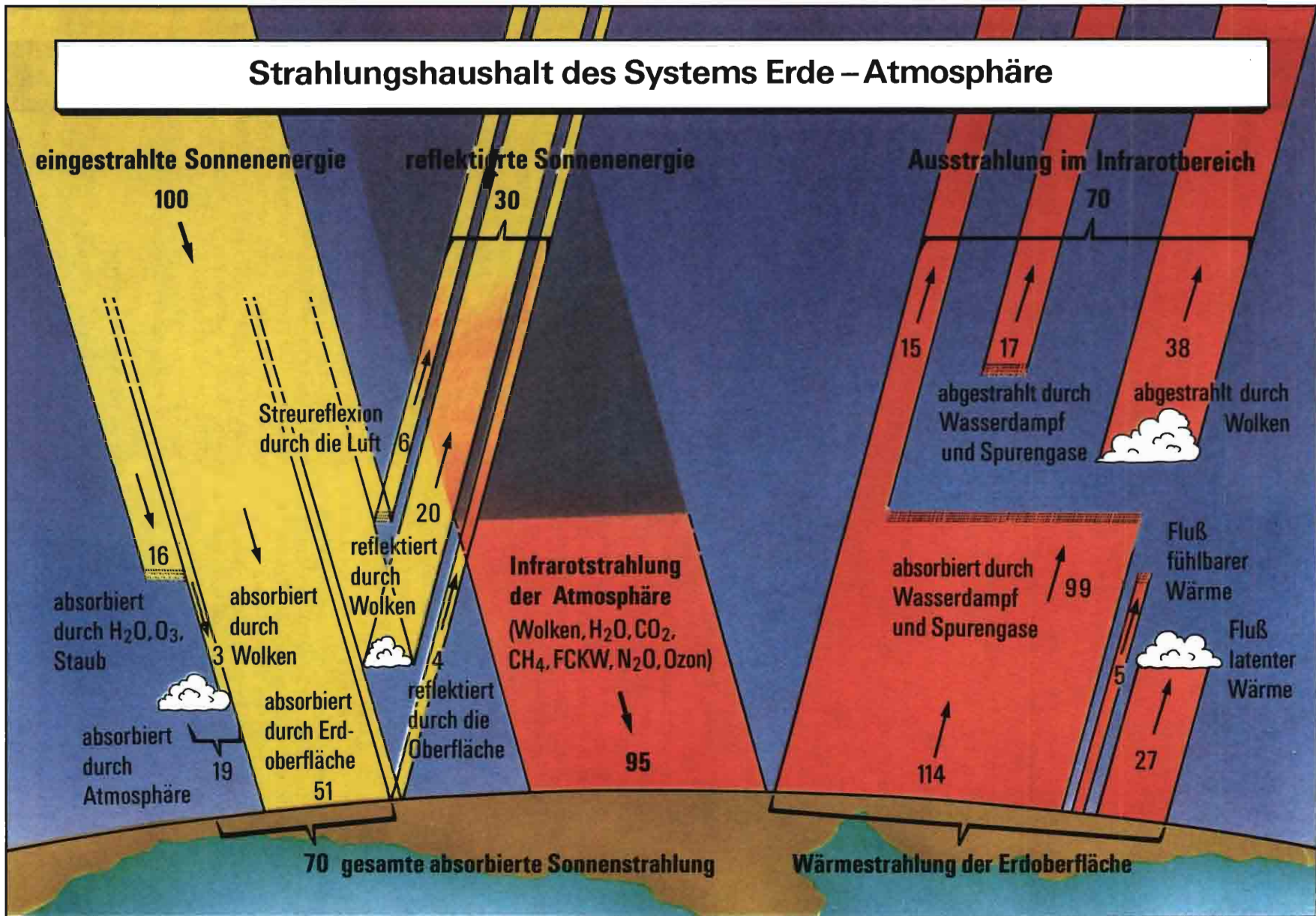


Abb. 17: Strahlungshaushalt der Erde (1993).

Verteilung der einfallenden Sonnenstrahlung auf Erdoberfläche und Atmosphäre. Am Rand der Atmosphäre und am Erdboden wird jeweils die Bilanzsumme gebildet. Die von links oben nach rechts unten gerichteten Balken geben die einfallenden Strahlungsflüßdichten, die von links unten nach rechts oben gerichteten Balken die hinausgehenden Strahlungsflüßdichten an.



erst an der Erdoberfläche wieder verdunstet. Dieser Energiegewinn ist in den Tropen wegen der dort vorherrschenden höheren Verdunstungsrate größer als in den höheren Breiten.

Beim Fluß fühlbarer Wärme wird die Energie vom erwärmten Erdboden durch turbulenten vertikalen Austausch in die untere Atmosphäre transportiert.

Die Abbildung 17 zeigt weiter, in welchem Umfang Gase, Aerosole und Wolken entsprechend ihrer optischen Eigenschaften zu den genannten Energiegewinnen und -verlusten beitragen. Beispielsweise absorbieren die Wolken insgesamt nur 3 Prozent der einfallenden solaren Strahlung, geben aber im Wärmestrahlungsbereich 38 Prozent – also mehr als die Erdoberfläche und die optisch aktiven Gase zusammen – an den Weltraum ab.

Es sei noch einmal betont, daß die eben dargestellten Zusammenhänge die globalen, langzeitlich gemittelten Verhältnisse beschreiben. Innerhalb des Systems Erde-Atmosphäre treten sehr starke räumliche und zeitliche Schwankungen der einzelnen Strahlungskomponenten auf, welche vom Sonnenstand, von den Reflexionseigenschaften und den Temperaturen an der Erdoberfläche ebenso abhängen wie von der räumlichen und zeitlichen Verteilung der Gase, Aerosole und Wolken in der Atmosphäre.

## 3.2 Der Treibhauseffekt

### 3.2.1 Strahlungs- und Energiebilanz

Sowohl über längere Zeiten als auch an jedem Ort gilt das Gesetz von der Energieerhaltung, das heißt für jedes Oberflächenelement, das keine Energie speichern kann, müssen sich die nach unten und nach oben gerichteten Energieflüsse ausgleichen. Das ist die Aussage der Energiebilanzgleichung

$$(1-A_s)I_s + \varepsilon I_t - \sigma T_s^4 = H + E + G \quad (11)$$

für eine Oberfläche.

Die linke Seite dieser Gleichung beschreibt die Nettostrahlungsflußdichte, nämlich

- im ersten Term die Bilanz der Sonnenstrahlung mit  $A_s$  = Reflexionsvermögen (Albedo),  $I_s$  = nach unten gerichtete Strahlungsflußdichte der Sonne:  $I_s = (1-A)I_{so}$ , wobei  $A$  derjenige Anteil an der Strahlungsflußdichte der Sonne  $I_{so}$  am Oberrand der Atmosphäre ist, der in der Atmosphäre absorbiert beziehungsweise in den Weltraum zurückgestreut worden ist,
- im zweiten Term die Gegenstrahlung der Atmosphäre im Wärmestrahlungsbereich (also das mittlere Absorptionsvermögen im Wärmestrahlungsbereich,  $I_t$  = atmosphärische Gegenstrahlung),
- im dritten Term die Emission der Oberfläche mit der Strahlungstemperatur  $T_s$ , ( $\sigma = 5,67 \times 10^{-8} \text{ Wm}^{-2}\text{K}^{-4}$  ist die Stefan-Boltzmann-Konstante). Für natürliche Oberflächen ist  $T_s$  nahe der wirklichen Temperatur.

Auf der rechten Seite von Gleichung (11) stehen die Energietransporte, welche die Nettostrahlungsflußdichte ausgleichen. Dies sind

- der Wärmefluß  $G$  in den Boden beziehungsweise den Ozean; dieser Fluß ist nur an der Erdoberfläche von Bedeutung ( $G > 0$  beschreibt einen Fluß von der Oberfläche weg),
- der Fluß fühlbarer Wärme  $H$  ( $H > 0$  bedeutet einen Wärmefluß nach oben),
- der Fluß latenter Wärme  $E$  (Vorzeichenkonvention wie bei  $H$ ).

Mit Hilfe der Gleichung (11) kann der Einfluß des Treibhauseffekts auf die Temperatur der Atmosphäre bestimmt werden. Dazu werden die Strahlungstemperaturen  $T_s$  einmal für die Verhältnisse am Oberrand der Atmosphäre (Fall 1) und einmal an der Erdoberfläche (Fall 2) berechnet.

Im Fall 1 bleibt die Wirkung der Erdatmosphäre auf die Strahlungstemperatur unberücksichtigt, das heißt es gilt  $A_s = 0,3$ ,  $I_t = 0,0$ ,  $G = H = E = 0$ . Dabei entspricht  $I_s = I_{so}$  genau einem Viertel der Solarkonstanten von 1 368 Watt pro  $\text{m}^2$ . Mit Solarkonstante bezeichnet man diejenige Strahlungsflußdichte (Strahlungsenergie pro Zeit- und Flächeneinheit), die am Außenrand der Atmosphäre bei mittlerem Abstand zur Sonne senkrecht zur Strahlrichtung der Sonne empfangen wird. Die Teilung durch vier ist notwendig, weil die Erdoberfläche, die von der Sonne senkrecht bestrahlt werden kann, dem Querschnitt der Erdkugel (und damit einem Viertel der Erdoberfläche) entspricht. Unter Berücksichtigung der in Abbildung 18 angegebenen Werte berechnet sich die Strahlungstemperatur  $T_s$  zu 255 K =  $-18^\circ\text{C}$ , die der globalen Durchschnittstemperatur in etwa 6 km Höhe entspricht.

Im Fall 2 wird die Wirkung der Atmosphäre berücksichtigt. Dabei wird  $(1-A_s)$  gleich 0,51 (anstelle von 0,70 wie im Fall 1),  $\varepsilon I_t$  wegen der atmosphärischen Gegenstrahlung gleich  $0,95 I_{so}$  und  $H + E + G$  gleich  $0,32 I_{so}$  gesetzt.

Gleichung (11) liefert für diesen Fall eine Wärmeausstrahlung der Erdoberfläche von 114 Prozent der Einstrahlung von der Sonne am Oberrand der Atmosphäre. Dies entspricht der Abstrahlung eines Körpers mit einer Temperatur von 288 K =  $15^\circ\text{C}$ .

Im Vergleich zu Fall 1 bewirken die Absorptions- und Emissionsvorgänge der optisch aktiven Substanzen in der Atmosphäre (Gase, Aerosole, Wolken) – unter Berücksichtigung der anderen Wärmetransporte – demnach einen Unterschied von  $33^\circ\text{C}$  zwischen der effektiven Strahlungstemperatur des Gesamtsystems und der Temperatur an der Oberfläche. Diese auf die optisch aktiven Substanzen zurückzuführende Temperaturzunahme wird in Analogie zu den Verhältnissen in einem Treibhaus auch als Treibhauseffekt der Atmosphäre bezeichnet. Wie Glas in einem Treibhaus lassen die klimarelevanten Gase in der Atmosphäre das Sonnenlicht nahezu ungestört passieren, verhindern aber die Abstrahlung im Wärmestrahlungsbereich in den Weltraum. Da die klimawirksamen Gase  $\text{H}_2\text{O}$ ,  $\text{CO}_2$ ,  $\text{O}_3$ ,  $\text{N}_2\text{O}$  und  $\text{CH}_4$  natürliche Bestandteile der Erdatmosphäre sind, wird ihre Wirkung auch als natürlicher Treibhauseffekt bezeichnet. Ohne die Wirkung des natürlichen Treibhauseffektes wären oberflächennahe Temperatur und Strahlungstemperatur des Gesamtsystems Erde-Atmosphäre identisch. In diesem Fall würde die mittlere Temperatur auf der

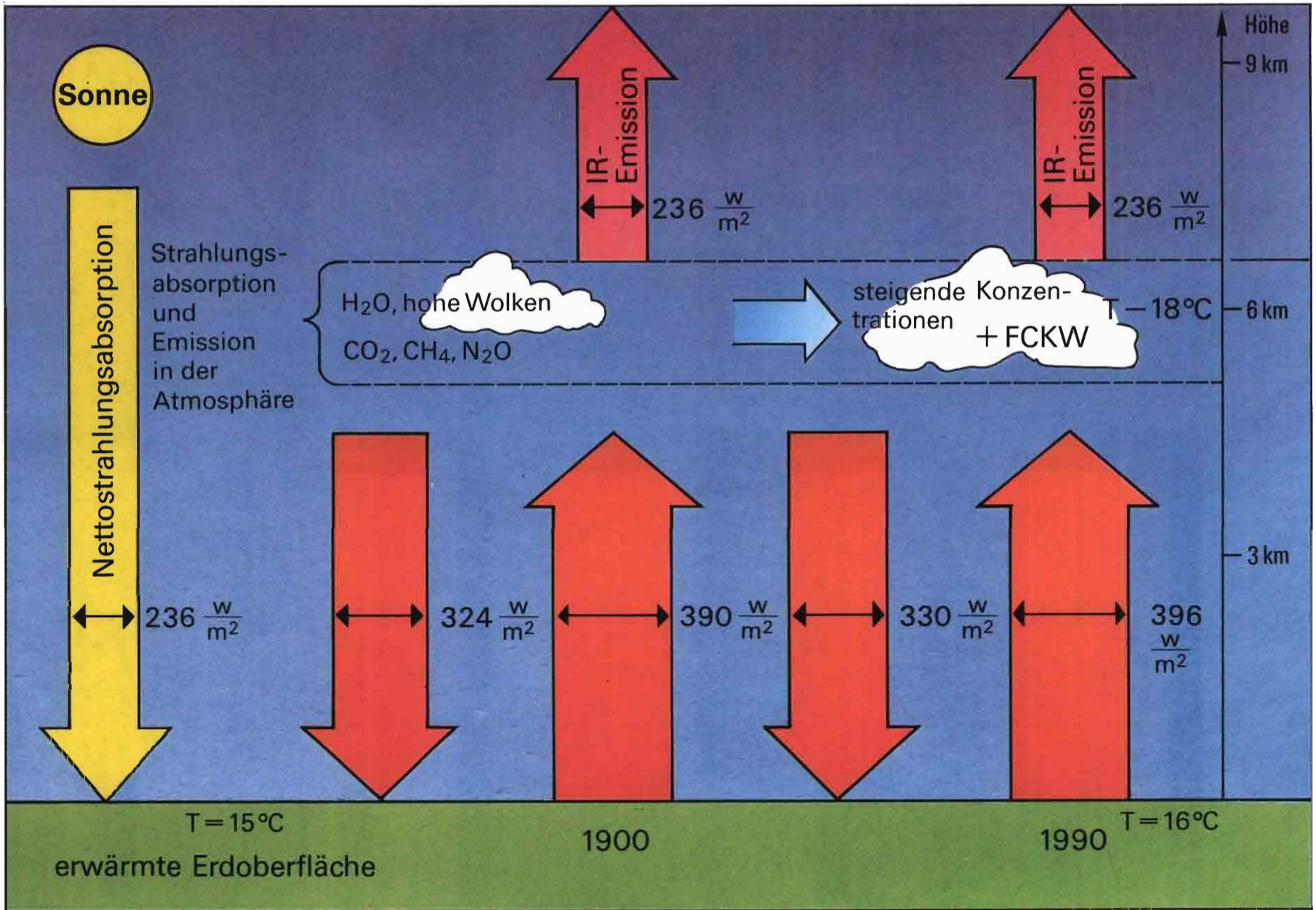


Abb. 18: Schematische Darstellung des Treibhauseffektes der Atmosphäre.

Erde etwa  $-18^{\circ}\text{C}$  betragen. Abbildung 18 zeigt den Treibhauseffekt noch einmal in anschaulicher Form für die Jahre 1900 und 1990.

Man erkennt sofort, daß eine Veränderung der Menge und/oder der Verteilung einzelner oder aller optisch aktiven Substanzen den Treibhauseffekt verändern muß.

### 3.2.2 Absorption der Treibhausgase

Abbildung 19 zeigt das Absorptionsvermögen in Abhängigkeit von der Wellenlänge für die fünf Gase Wasserdampf ( $\text{H}_2\text{O}$ ), Kohlendioxid ( $\text{CO}_2$ ), Ozon ( $\text{O}_3$ ), Lachgas ( $\text{N}_2\text{O}$ ) und Methan ( $\text{CH}_4$ ) im Bereich der Wärmestrahlung.

Beim Wasserdampf erkennt man das bekannte „Fenster“ zwischen 8 und 12  $\mu\text{m}$ , das zwischen den Gebieten starker Absorption im Bereich der 6,3  $\mu\text{m}$ -Bande und den gestrichelt angedeuteten Rotationsbanden liegt. Andere Treibhausgase tragen dann besonders effektiv zur Strahlungsabsorption bei, wenn sie in jenen Bereichen optisch aktiv sind, in denen der Wasserdampf die Wärmestrahlung nahezu ungehindert passieren läßt. Neben dem eben beschriebenen „Fenster“, in dem die infrarote Ausstrahlung bei Erdoberflächentemperaturen zwischen  $-20^{\circ}\text{C}$  und  $+50^{\circ}\text{C}$  ihr Maximum hat, ist dies der Spektralbereich zwischen 12 und 18  $\mu\text{m}$ , in dem der Wasserdampf noch nicht vollständig absorbiert.

Im „Fenster“-Bereich selbst liegen noch immer Wasserdampfabsorptionslinien und die quasikontinuierliche Absorption des Wasserdampfes. Letztere steigt mit dem Quadrat des Wasserdampfpartialdrucks an, wodurch wegen des exponentiellen Anstiegs des  $\text{H}_2\text{O}$ -Partialdrucks mit der Temperatur eine starke Temperatur-Wasserdampf-Rückkopplung entsteht. Der Einfluß dieser Kontinuumabsorption auf den

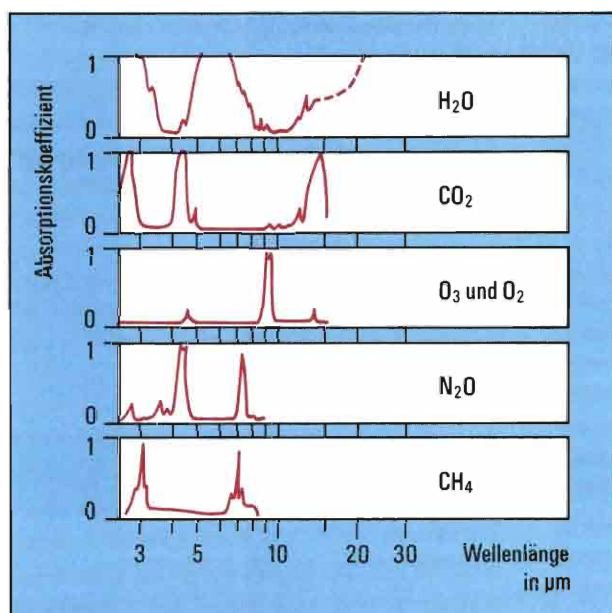


Abb. 19: Stark geglättete Absorptionsspektren der Treibhausgase in der Atmosphäre, nach ihrer Bedeutung gereiht.

Treibhauseffekt ist bisher möglicherweise unterschätzt worden. Die Unsicherheit bei ihrer Berechnung liegt jedenfalls in der Größenordnung von einigen Watt pro Quadratmeter (194). Dieser Effekt ist in den Tropen am stärksten.

Auffallend in Abbildung 19 ist auch die fast vollständige Absorption durch Kohlendioxid bei 15  $\mu\text{m}$ . Demnach führt eine Erhöhung der  $\text{CO}_2$ -Konzentration nur zu einer vergleichsweise geringen Veränderung des Treibhauseffekts durch zusätzliche Absorption der 15  $\mu\text{m}$ -Bande. Die Zunahme des Treibhauseffekts erfolgt in einer solchen fast gesättigten Bande in guter Näherung logarithmisch, das heißt, jede Verdoppelung der  $\text{CO}_2$ -Konzentration bewirkt die gleiche Erhöhung der Temperatur (um etwa  $2,5^{\circ}\text{C}$ ).

Im Gegensatz zur Erwärmung der Troposphäre führt die Zunahme des atmosphärischen  $\text{CO}_2$ -Gehaltes zu einer Abkühlung in der Stratosphäre. Dort ist das Kohlendioxid für einen großen Teil der infraroten Ausstrahlung in den Weltraum verantwortlich, da die Stratosphäre etwa einhundertmal mehr  $\text{CO}_2$  als Wasserdampf enthält. Die niedrige Wasserdampfkonzentration in der Stratosphäre ist auf die niedrigen Temperaturen im Bereich der Tropopause zurückzuführen (vgl. Nr. 1.4.1). Dagegen wird die  $\text{CO}_2$ -Konzentration von ähnlichen Vorgängen beeinflusst. Da in der Stratosphäre die Temperatur mit der Höhe wieder zunimmt, emittiert das Kohlendioxid mit der Höhe zunehmend wirksam infrarote Strahlung in den Weltraum. Dadurch wird die gleichzeitig ablaufende Erwärmung der Stratosphäre durch die Ozonabsorption im kurzwelligen Spektrum der Sonnenstrahlung zum Teil wieder kompensiert. Nimmt die  $\text{CO}_2$ -Konzentration zeitlich zu, wird die Ausstrahlung aus der Stratosphäre verstärkt und führt dadurch zu einer Abkühlung, die sich im Bereich der oberen Stratosphäre besonders stark bemerkbar macht.

Abbildung 19 zeigt weiterhin, daß das Ozon im Zentrum des infraroten Wasserdampffensers — neben seinen Absorptionsbereichen im solaren Spektrum — ebenfalls eine starke Bande bei 9,6  $\mu\text{m}$  hat. Analog zum Kohlendioxid wird dadurch in der Troposphäre und unteren Stratosphäre eine Strahlungserwärmung und in der oberen Stratosphäre eine Strahlungsabkühlung eintreten. Die Ozonkonzentration in der Troposphäre steigt in den mittleren Breiten der Nordhemisphäre stark an. Damit liefert das Ozon ebenfalls einen Beitrag zum zusätzlichen Treibhauseffekt.

Lachgas, Methan und die Fluorchlorkohlenwasserstoffe (FCKW) absorbieren Strahlung fast ausschließlich im infraroten Spektralbereich. Ihre Konzentrationen sind wesentlich geringer als die des  $\text{CO}_2$ . Andererseits sind die Banden dieser Spurengase im Wasserdampf-„Fenster“ (vgl. Abbildung 19) nicht gesättigt, so daß ein zusätzliches Molekül dieser Gase die Strahlungsabsorption viel stärker erhöht als ein zusätzliches  $\text{CO}_2$ -Molekül.

Die Absorptionsparameter — Linienposition und -parameter — sind für die genannten optisch aktiven Gase recht gut bekannt. Dies gilt vor allem für die wichtigsten Treibhausgase  $\text{H}_2\text{O}$ ,  $\text{CO}_2$  und  $\text{O}_3$ , so daß die Strahlungsflüsse für breite Spektralbereiche dieser Gase mit guter Genauigkeit berechnet werden

können. Auch bei Methan und Lachgas sind die hauptsächlichen Banden mit hinreichender Genauigkeit (etwa 5 Prozent) für die Verwendung in Strahlungsübertragungsmodellen bekannt. Dagegen sind die spektroskopischen Daten für die FCKW nur unzureichend bekannt. Detaillierte Informationen über die Lage der Absorptionsbanden im Spektrum können einem Atlas der NASA aus dem Jahr 1987 entnommen werden. Eine Vielzahl spektroskopischer Daten aller besonders wichtigen Gase in der Atmosphäre ist in der international anerkannten Datenbasis HITRAN (letzte Version von 1986) enthalten, die vom AFGL (U.S. Air Force Geophysics Laboratory) zusammengestellt wird. Diese enthält im Fall der FCKW aber nur Werte der Absorptionskoeffizienten für eine Temperatur. Um die Strahlungsflüsse mit guter Genauigkeit modellieren zu können, müssen jedoch zusätzlich die Temperatur- und die Druckabhängigkeit dieser Koeffizienten bekannt sein.

Abschließend sei erwähnt, daß sich das Methan nicht nur direkt im Strahlungshaushalt auswirkt, sondern auch die Chemie der Atmosphäre beeinflusst. So ist die Methanoxidation eine wichtige Wasserdampfquelle in der Stratosphäre sowie eine wichtige Quelle für das troposphärische Ozon, das die Chemie der Troposphäre entscheidend beeinflusst. Beide Gase, Wasserdampf in der Stratosphäre und Ozon in der Troposphäre, sind Treibhausgase, so daß Methan auch nach der Oxidation klimarelevant bleibt.

### 3.2.3 Anteil der einzelnen Gase am Treibhauseffekt

Der Treibhauseffekt beruht wesentlich darauf, daß die langwellige Strahlung von der Erdoberfläche durch

die Gase Wasserdampf, Kohlendioxid, Methan, Lachgas und die FCKW sowie durch Wolken und Aerosole absorbiert wird (vgl. Nr. 3.2.2). Der Wasserdampf, das Kohlendioxid und die Wolken haben zur Zeit zusammen einen Anteil von 90 Prozent, der Wasserdampf alleine von 65 Prozent am Treibhauseffekt. Der Rest verteilt sich auf die anderen Spurengase.

Die Strahlungswirkung eines Treibhausgases wird als Treibhauspotential (GWP, Greenhouse Warming Potential) bezeichnet. Die Änderung der Strahlungsbilanz des Systems Atmosphäre/Oberfläche bei einer Änderung der Konzentration eines Treibhausgases kann für CO<sub>2</sub> recht zuverlässig berechnet werden. Der Anstieg des CO<sub>2</sub>-Gehaltes von 279 ppmv im Jahre 1765 auf 354 ppmv im Jahre 1990, also um 75 ppmv, ist zu einer zusätzlich absorbierten Strahlungsenergie von 1,5 Watt pro Quadratmeter äquivalent.

In Tabelle 9 wird das relative GWP der wichtigsten anthropogenen Treibhausgase bezogen auf das Kohlendioxid angegeben. Es ist ein Maß dafür, wieviel effektiver ein zusätzliches Molekül oder Kilogramm eines Treibhausgases in der Atmosphäre im Vergleich zu Kohlendioxid absorbiert. Hat beispielsweise das Methan ein GWP von 21, so bedeutet dies, daß das GWP von einem Molekül Methan 21 mal größer ist als das eines Moleküls CO<sub>2</sub>. Dies gilt aber nur für die gegenwärtige Konzentration von CO<sub>2</sub> in der Atmosphäre.

In Tabelle 10 werden die relativen Treibhauspotentiale auch bezüglich der Emission dargestellt, da diese Berechnungsmethode für Entscheidungen bei Emissionsminderungen sehr wichtig ist. Das emissionsbezogene GWP gibt an, wieviel Strahlung langfristig in der Atmosphäre durch die Emission eines Kilogramms

Tabelle 9

#### Charakteristika der Treibhausgase (194)

Konzentration (c), Verweilzeit in der Atmosphäre und Biosphäre (t), Zunahme in Prozent pro Jahr ( $\Delta c/\Delta t$ ) relatives Treibhauspotential (GWP) bezogen auf das gleiche Volumen CO<sub>2</sub> (Mol.) und bezogen auf die gleiche Masse CO<sub>2</sub> (kg) und Anteil der einzelnen Treibhausgase am zusätzlichen Treibhauseffekt in den achtziger Jahren dieses Jahrhunderts (Anteil):

Treibhausgas	CO <sub>2</sub>	CH <sub>4</sub>	N <sub>2</sub> O	Ozon <sup>1)</sup>	FCKW 11	FCKW 12
c (in ppmv) . . . . .	354	1,72	0,31	0,03	0,00028	0,00048
t (in Jahren) . . . . .	120 <sup>2)</sup>	10	150	0,1	60	130
$\Delta c/\Delta t$ (in %/Jahr) . . . . .	0,5	1,0	0,25	0,5 <sup>5)</sup>	5	3
rel. GWP (Mol.) . . . . .	1	21	206	2 000	12 400	15 800
rel. GWP (kg) . . . . .	1	58	206	1 800	3 970	5 750
Anteil in % <sup>3)</sup> . . . . .	50	13 <sup>4)</sup>	5	7 <sup>6)</sup>	5	12

1) Sämtliche Angaben sind sehr grobe Mittelwerte, da die Ozonkonzentration in der Troposphäre räumlich und zeitlich sehr variabel ist (vgl. Nr. 1.3).

2) Streng genommen besitzt CO<sub>2</sub> eine wesentlich kürzere Verweilzeit, wenn die Austauschvorgänge zwischen Atmosphäre und Biosphäre einerseits und Atmosphäre und Ozean bis in große Tiefen andererseits betrachtet werden. Die genannte Verweilzeit von 120 Jahren beinhaltet auch Phasen, in denen das CO<sub>2</sub> in andere Kohlenstoffverbindungen überführt wird. Mit dieser Verweilzeit wird zum Ausdruck gebracht, daß es etwa 120 Jahre dauert, bis eine freigesetzte CO<sub>2</sub>-Menge auf etwa ein Drittel ihres ursprünglichen Wertes im wesentlichen durch Aufnahme in den Ozean abgesunken ist.

3) Diese Anteile geben in der Summe nur 93 Prozent, da die anderen FCKW nicht enthalten sind. Ihr Anteil liegt etwa bei 7 Prozent, der Anteil des stratosphärischen Wasserdampfes bei 3 Prozent.

4) In diesem Anteil von 13 Prozent von CH<sub>4</sub> sind nur die direkten Effekte enthalten. Die indirekten Effekte sind in Tabelle 11 aufgeführt.

5) Anstieg nur in der Troposphäre der Nordhemisphäre.

6) Der Beitrag des Ozons kann nur sehr unsicher quantifiziert werden.

**Treibhauspotentiale für verschiedene Zeitperioden (195)**  
**Relative auf die Einheitsmasse der Emission bezogene Treibhauspotentiale der wichtigsten anthropogenen Treibhausgase für verschiedene Zeitabschnitte ab Emissionsdatum**  
 (vgl. auch Tabelle 11)

Treibhausgas	t (in Jahren)	GWP		
		20 Jahre	100 Jahre	500 Jahre
CO <sub>2</sub> .....	120 <sup>1)</sup>	1	1	1
CH <sub>4</sub> <sup>2)</sup> .....	10	63	21	9
N <sub>2</sub> O .....	150	270	290	190
FCKW 11 .....	60	4 500	3 500	1 500
FCKW 12 .....	130	7 100	7 300	4 500

1) Vgl. 2) in Tabelle 9  
 2) jeweils einschließlich der indirekten Effekte

eines Treibhausgases absorbiert wird. Hierbei wird – im Gegensatz zum GWP bezüglich der Konzentration – auch der Abbau dieser Treibhausgase in der Atmosphäre berücksichtigt. Die Zeit, die normalerweise vergeht, bis ein bestimmter Prozentsatz eines Treibhausgases in der Atmosphäre abgebaut wird, wird genannt. Meist wird der Abbau auf etwa ein Drittel, genauer 36,8 Prozent, als Maß genommen. Die so definierten Verweilzeiten sind in Tabelle 11 aufgeführt.

In Tabelle 9 fällt auf, daß CO<sub>2</sub> das geringste Treibhauspotential aller anthropogenen Treibhausgase hat. Aus dieser Tabelle ist zusätzlich ersichtlich, daß in den achtziger Jahren dieses Jahrhunderts das Kohlendioxid etwa zur Hälfte den zusätzlichen Treibhauseffekt hervorrief, die FCKW etwa zu einem Viertel. Hierbei muß man berücksichtigen, daß die Strahlungswirkungen von Methan und N<sub>2</sub>O nicht so genau bekannt sind wie die von CO<sub>2</sub>; die Strahlungswirkung der FCKW ist noch weniger bekannt. Die Strahlungswirkung des Ozons in der Troposphäre läßt sich nur schwer bestimmen, da sie von seiner Vertikalverteilung

abhängt. Dasselbe gilt natürlich auch für jedes andere Treibhausgas, dessen Mischungsverhältnis ein ausgeprägtes Vertikalprofil aufweist.

In Tabelle 10 wird das gewichtsbezogene GWP der einzelnen Treibhausgase für verschiedene Zeithorizonte dargestellt. In diesen unterschiedlichen Zeithorizonten kommt zum Ausdruck, daß die einzelnen Treibhausgase unterschiedlich schnell aus der Atmosphäre verschwinden. Das GWP eines Kilogramms Methan ist beispielsweise 63mal höher als das eines Kilogramms Kohlendioxid, wenn man die Wirkung über einen Zeitraum von 20 Jahren betrachtet. Betrachtet man hingegen einen Zeitraum von 100 Jahren, so vermindert sich die Treibhauswirksamkeit relativ zu Kohlendioxid erheblich, da die Lebensdauer von Methan etwa 10 Jahre beträgt, die des anthropogenen Kohlendioxids aber 120 Jahre.

In Tabelle 11 sind die GWPs der indirekt klimawirksamen Treibhausgase aufgelistet. Dabei ist berücksichtigt, daß sich Ozon, CO<sub>2</sub> und Wasserdampf (vor

Tabelle 11

**Relatives auf die Einheitsmasse der Emission von CO<sub>2</sub> bezogenes Treibhauspotential für die indirekt klimawirksamen Spurengase (196)**

Die Tabelle ordnet den Treibhauseffekt des bei chemischen Umwandlungen entstandenen Treibhausgases dem ursprünglichen Spurengas zu

Spurengas	entsprechendes Treibhausgas	GWP		
		20 Jahre	100 Jahre	500 Jahre
CH <sub>4</sub> .....	Ozon (troposph.)	24	8	3
CH <sub>4</sub> .....	CO <sub>2</sub>	3	3	3
CH <sub>4</sub> .....	H <sub>2</sub> O (stratosph.)	10	4	1
CO .....	Ozon (troposph.)	5	1	0
CO .....	CO <sub>2</sub>	2	2	2
NO <sub>x</sub> .....	Ozon (troposph.)	150	40	14
NMKW .....	Ozon (troposph.)	28	8	3
NMKW .....	CO <sub>2</sub>	3	3	3

1) CH<sub>4</sub> ist auch ein direktes Treibhausgas.

allem in der Stratosphäre) aus Methan bilden können (vgl. Nr. 2.1). Aus dieser Tabelle ist ersichtlich, daß die indirekte Wirkung des Methans größer ist als die direkte.

### 3.3 Ursachen für die Änderung des Strahlungshaushaltes

#### 3.3.1 Treibhausgase und indirekt klimawirksame Gase

Seit Beginn der Industrialisierung haben die mit unterschiedlichen Aktivitäten des Menschen zusammenhängenden zusätzlichen Emissionen rasch zugenommen. So ist beispielsweise die CO<sub>2</sub>-Konzentration in der Atmosphäre in den vergangenen 200 Jahren von 279 ppmv auf gegenwärtig 354 ppmv angestiegen. Im gleichen Zeitraum sind die Konzentrationen von Methan von 0,79 ppmv auf gegenwärtig 1,72 ppmv und von Lachgas von 285 ppbv auf 310 ppbv angestiegen. Weiterhin nimmt die Konzentration des troposphärischen Ozons auf der Nordhemisphäre zu. Die FCKW sind synthetischer Natur und demnach in der vorindustriellen Atmosphäre nicht nachweisbar, haben mittlerweile aber Konzentrationen von 0,28 ppbv (FCKW 11) und 0,485 ppbv (FCKW 12) erreicht.

Da alle diese Gase im Bereich des Wasserdampf-„Fensters“ im infraroten Spektralbereich optisch aktiv sind, ist durch die höhere Konzentration der genannten Gase ein zusätzlicher Treibhauseffekt entstanden, zu dem das Kohlendioxid 55 Prozent, das Methan 15 Prozent, die FCKW 11 Prozent, das troposphärische Ozon 10 Prozent und das Lachgas 4 Prozent beitragen. Die restlichen 5 Prozent entfallen auf die Zunahme des Wasserdampfs in der Stratosphäre, der hauptsächlich durch die Zunahme des CH<sub>4</sub>-Gehalts in der Troposphäre bedingt ist (197).

Wird der zusätzliche Treibhauseffekt auf die Änderung der Emissionsraten der einzelnen klimawirksamen Spurengase bezogen, so ergibt sich für das vergangene Jahrzehnt eine etwas andere Gewichtung der einzelnen Beiträge zum zusätzlichen Treibhauseffekt. In den achtziger Jahren hatte das Kohlendioxid nur einen Anteil von 50 Prozent am zusätzlichen Treibhauseffekt und das Methan nur von 13 Prozent, während der FCKW-Anteil auf 22 Prozent und derjenige des troposphärischen Ozons auf 7 Prozent angewachsen ist. Der Rest entfällt mit 5 Prozent auf Lachgas und mit 3 Prozent auf stratosphärischen Wasserdampf.

Aus den in der Tabelle 9 zusammengefaßten Angaben läßt sich die zukünftige Entwicklung des zusätzlichen Treibhauseffekts bei einer weiteren Zunahme der zusätzlichen Emissionen klimarelevanter Spurengase abschätzen. Für einen beschränkten Zeitraum, in dem der Strahlungsantrieb annähernd konstant ist, kann zumindest das Treibhauspotential vorhergesagt werden, wenn der zeitliche Verlauf der emittierten Mengen bekannt ist.

In diesem Zusammenhang ist darauf hinzuweisen, daß ein zusätzlicher Treibhauseffekt nicht nur durch die mengenmäßige Zunahme der klimarelevanten

Spurengase, sondern auch durch eine Veränderung der räumlichen – vor allem der vertikalen – Verteilung der Treibhausgase verursacht werden kann. Dies betrifft insbesondere den Wasserdampf, dessen Konzentration und vertikale Verteilung sich im Falle einer Erwärmung der tropischen Ozeane, die immerhin etwa 10 Prozent der Erdoberfläche bedecken, signifikant verändern werden. Gerade wegen der oben angesprochenen Unsicherheiten bei der Absorption des Wasserdampfs im Fensterbereich um 10 µm sollte der Einfluß des zusätzlichen Wasserdampfs im Strahlungshaushalt näher untersucht werden.

Eine Veränderung ist aber auch in der Vertikalverteilung des Ozons zu beobachten, dessen Konzentration in der Stratosphäre ab- und in der Troposphäre allmählich zunimmt. Wie sehr sich dies auf die Vertikalverteilung der Temperatur auswirkt, ist jedoch noch nicht im Detail untersucht worden. Vorstellbar ist, daß die Troposphäre etwas labiler wird und damit verbunden häufiger Gewitter entstehen.

#### 3.3.2 Aerosolteilchen

Feste oder flüssige Teilchen in der Luft mit einer Größe zwischen 0,001 µm und 100 µm Durchmesser werden Aerosolteilchen oder verkürzt Aerosole genannt. Ihr Einfluß auf die Strahlungsbilanz der Erde ist groß, jedoch nicht einfach zu beschreiben und teilweise schlecht verstanden. Dieses ist darauf zurückzuführen, daß die Aufenthaltsdauer der Aerosole mit einigen Tagen bis Wochen sehr kurz ist und dadurch ihre globale Verteilung starke Variationen aufweist. Längerfristige globale Änderungen der Aerosolteilchendichte sind deshalb schwer nachweisbar. In einzelnen Industrieregionen wird eine Zunahme der Aerosolkonzentration beobachtet. So zeigen die seit 1948 im östlichen Teil Nordamerikas durchgeführten Sichtweitenmessungen, daß die Trübung in den Sommermonaten in diesem Zeitraum zugenommen hat (198).

Die Größenverteilung der Aerosolteilchen ist von der Feuchte abhängig. Damit ist auch die chemische Zusammensetzung und die Substanzmischung eines Teilchens durch die Feuchte mitbestimmt. Da Substanzen wie beispielsweise Ruß andere optische Eigenschaften haben als das Wasser, ändern sich die Streu- und Absorptionseigenschaften der Aerosolteilchen ebenfalls mit der Feuchte. Ob die troposphärischen Aerosole eine regionale Abkühlung oder eine Erwärmung bewirken, hängt nicht nur von den Partikeleigenschaften selbst ab, sondern auch von der Bodenbedo und vom Sonnenstand. Abkühlend wirken sie vor allem bei geringer Oberflächenbedo, also über den Ozeanen. Bei hoher Oberflächenbedo, wie über Wüstengebieten sowie schnee- und eisbedeckten Gebieten, können sie zu einer Erhöhung des Treibhauseffektes der Atmosphäre beitragen. Ihre Wirkung ist dann – anders als bei den anderen Spurengasen – im Bereich des Wasserdampffenster im infraroten Spektralbereich nicht größer als im Bereich der Sonnenstrahlung. In beiden Bereichen erhöht sie aber die Strahlungsbilanz.

Im Gegensatz zur Troposphäre schwankt die Verteilung der Aerosolpartikel in der Stratosphäre wegen

der erhöhten Verweilzeit zeitlich nicht so stark. Mehrjährige Änderungen des stratosphärischen Aerosols sind Folge einzelner starker Vulkanausbrüche. Aufgrund der geringen Größe (etwa 0,5 µm Durchmesser) und der chemischen Zusammensetzung dieser Teilchen (vorwiegend Schwefelsäuretröpfchen) wird Sonnenlicht hauptsächlich gestreut und die Wärmestrahlung fast nicht absorbiert. Daher tragen die Aerosolteilchen in der Stratosphäre zu einer Abkühlung der unteren Atmosphäre und der Erdoberfläche bei.

Nach Vulkanausbrüchen, bei denen Teilchen und Gase in die Stratosphäre gelangen (die schwefelhaltigen Gase werden in wenigen Monaten zu Schwefelsäure umgewandelt), kann der Einfluß der stratosphärischen Aerosolschichten auf den Strahlungshaushalt des Systems Erde/Atmosphäre eindeutig gemessen werden. Während die Aerosolschichten in der Stratosphäre sich erwärmen, wird an der Erdoberfläche regional eine Abkühlung registriert. Es kann sogar zu weltweiten Abkühlungseffekten kommen, wie beispielsweise nach den Ausbrüchen des Tambora (1815) oder Krakatau (1883). Ein langfristiger Trend der stratosphärischen Aerosolkonzentration ist noch nicht zweifelsfrei festgestellt worden. Im verzögerten Abklingen der Belastung mit Aerosolen nach dem Ausbruch des Vulkanes El Chichon in Mexiko im Jahre 1982 deutet sich eine Erhöhung der Konzentration an.

Eine wichtige Aerosolquelle für die Troposphäre ist die Winderosion in Wüstenregionen, die bei weiter fortschreitender Wüstenbildung zukünftig zunehmen dürfte. Der Einfluß beispielsweise von luftgetragendem Saharastaub über dem Atlantik und dem Mittelmeergebiet ist schon länger mittels Satellitenbildern eindeutig nachgewiesen worden. Während solcher Episoden bewirken diese Wüstenstaubteilchen vor allem über dunklen Oberflächen eine Erniedrigung der Strahlungsbilanz, das heißt Energieverlust für die Erde.

Weitere Aerosole geraten durch den Menschen in die Troposphäre, entweder, indem sie direkt emittiert werden, oder dadurch, daß sie erst in der Atmosphäre durch Umwandlung aus Schadgasen entstehen. Die bei Verbrennungsprozessen entstandenen, direkt in die Atmosphäre entweichenden Teilchen können erhebliche Rußanteile enthalten. Dies führt zu einer stärkeren Absorption von Sonnenstrahlung und zu einer Erwärmung der das Aerosol enthaltenden Schichten.

Auch der im Winterhalbjahr aus nördlichen Industriegebieten in die Arktis transportierte Dunst („arctic haze“) enthält Ruß. Dessen Absorptionsfähigkeit erniedrigt über den hellen Oberflächen die lokale Albedo der Erde.

Die wohl größte Wirkung der Aerosolteilchen besteht in ihrem indirekten Einfluß auf die optischen Eigenschaften der Wolken und auf die Niederschlagsbildung. Während in der bodennahen Schicht mit etwa 1 000 bis 10 000 Teilchen pro cm<sup>3</sup> immer genügend Kondensationskeime zur Verfügung stehen, enthält die mittlere und obere Troposphäre nur etwa 100 Teilchen pro cm<sup>3</sup>. Über den Meeren besteht ein nennenswerter Anteil der Kondensationskeime aus Sulfat, das durch die photochemische Oxidation von Dimethyl-

sulfid entsteht. Die Zahl der Wolkenröpfchen, der Flüssigwassergehalt der Wolken sowie der Beginn der Niederschlagsbildung ist von der Vertikalgeschwindigkeit, der Anzahl und der Größenverteilung der Aerosolpartikel und ihrer chemischen Zusammensetzung abhängig. Die über Norddeutschland nachgewiesene zeitliche Zunahme der Gesamtaerosolmasse (199), die im wesentlichen auf die chemische Umwandlung von SO<sub>2</sub>, NO<sub>x</sub> und NH<sub>3</sub>-Teilchen zurückzuführen ist, sollte die bei unveränderten dynamischen Bedingungen entstehenden niedrigen Wolken derart verändern, daß sie eine höhere Albedo haben (200). Mit Hilfe von Satellitenbildern konnte auch bei niedrigen Wolken eine Albedoerhöhung als Folge der Partikelemissionen einzelner Schiffe und Ölbohrplattformen nachgewiesen werden (201). Beide Ergebnisse stehen im Einklang mit Ergebnissen, die mit Hilfe eines globalen Aerosoltransportmodells berechnet wurden und eine Albedoerhöhung der nördlichen Hemisphäre durch anthropogene Partikelemissionen zeigen (202). Der zusätzliche Treibhauseffekt durch die Spurengaszunahme kann durch diesen gegenläufigen Effekt allerdings höchstens in Teilen der nördlichen Erdhälfte kompensiert werden.

Die Partikelemission als Folge großflächiger Brände in den Savannen und in tropischen Wäldern ist in Satellitenbildern nachweisbar und in der während der Trockenzeit wolkenarmen Subtropenzone im Strahlungshaushalt wirksam. Ein weiterer Einfluß von rußhaltigen Aerosolen ist darin zu sehen, daß sie die optischen Eigenschaften erheblich verändern können. Die Absorption von Sonnenstrahlung in der Wolke nimmt dabei zu und der den Boden erreichende Teil der Sonnenstrahlung ab.

Wie stark Änderungen des Aerosolgehalts im regionalen, hemisphärischen oder globalen Maßstab wirken, kann mit Sicherheit noch nicht angegeben werden. Allerdings könnte nach Wigley (203) der in der nördlichen Hemisphäre zwischen 1940 und 1975 beobachtete Temperaturrückgang auch auf den Einfluß einer erhöhten Lufttrübung und entsprechend modifizierter Wolken zurückzuführen sein.

### 3.3.3 Wolken

Der Einfluß der Wolken und die damit verknüpften Rückkopplungen auf den Strahlungshaushalt und das Klima sind sehr komplex. Dabei hängt die Richtung der Veränderung – zusätzliche Erwärmung oder Abkühlung – in erster Linie davon ab, ob sich die Häufigkeit der niederen oder der hohen Wolken verändert.

Die Wolken in der unteren Troposphäre dämpfen den Treibhauseffekt, da ihre Albedo im Spektralbereich der Sonnenstrahlung höher ist als diejenige der Erdoberfläche und andererseits die Wärme bei einer höheren Strahlungstemperatur abgestrahlt wird als ohne Wolken. Die Albedo nähert sich derjenigen des Erdbodens umso mehr, je tiefer diese Wolken liegen.

Im Gegensatz dazu verstärken die hochliegenden Eiswolken (oberhalb von etwa 6 km) den Treibhauseffekt in den meisten Fällen. Sie verstärken aufgrund ihrer

optischen Eigenschaften den nach vorne gestreuten Anteil der Sonnenstrahlung, das heißt, im Vergleich zum wolkenfreien Fall dringt mehr Sonnenstrahlung in die Atmosphäre ein. Dagegen wird die Wärmestrahlung durch die hohen Wolken stark absorbiert, so daß die aus tieferen Schichten stammende Ausstrahlung nicht direkt entweichen kann. Wegen ihrer niedrigen Temperatur strahlen die Eiswolken selbst sehr wenig in Richtung Weltraum ab. Dadurch erniedrigt sich die effektive Strahlungstemperatur des Gesamtsystems.

Der letztgenannte Effekt ist umso größer, je höher sich die Eiswolken befinden. Das bedeutet, daß das Treibhauspotential dieser Wolken in der Nähe der Tropopause bei Temperaturen von  $-50^{\circ}\text{C}$  bis  $-80^{\circ}\text{C}$  besonders hoch ist. Deshalb sollte dem Flugverkehr in Höhen von 10 bis 13 km und den damit verbundenen Wasserdampfemissionen größere Aufmerksamkeit gewidmet werden. Es ist gegenwärtig nämlich noch nicht klar, wie groß die Zunahme der Eiswolken durch Kondensstreifen, verursacht durch den Flugverkehr, ist und welche besonderen Strahlungseigenschaften diese Wolken haben.

### 3.3.4 Andere Parameter

Die Oberflächenalbedo verändert sich als Folge der Bildung von Wüsten, der Versalzung, der Rodung der tropischen Regenwälder, der Verstädterung und der intensiven Landwirtschaft. Diese Veränderung wird für die vergangenen 1 000 Jahre mit 0,6 Prozent und allein für die vergangenen zwanzig Jahre mit 0,1 Prozent geschätzt (204). Der daraus resultierende Strahlungsantrieb wird auf maximal 0,03 Watt pro  $\text{m}^2$  geschätzt (205). Den größeren Einfluß haben veränderte Oberflächeneigenschaften wohl auf den Wasserhaushalt und die Bodenrauhigkeit.

## 4. Literaturverzeichnis

1. Bolin, B.; Döös, B.R.; Jäger, J.; Warrick, R.A.: The Greenhouse Effect, Climatic Change and Ecosystems. SCOPE-Report Nr. 29, John Wiley and Sons, Chichester, England, 1986  
nach Enquete-Kommission „Vorsorge zum Schutz der Erdatmosphäre“: Schutz der Erdatmosphäre. Eine internationale Herausforderung. In: Zur Sache. Themen parlamentarischer Beratung. Deutscher Bundestag, Bonn, 1988
2. nach Enquete-Kommission „Vorsorge zum Schutz der Erdatmosphäre“, 1988
3. nach Junge, C.E.: The cycle of atmospheric trace gases — natural and man made. Quart. J. Roy. Meteorol. Soc. Band 98, 1972, S. 711-716  
und Zellner, R.; Weibring, G.: Atmospheric in-situ photochemical formation of  $\text{N}_2\text{O}$ . Nature, 1990, Manuskript eingereicht
4. Baumgartner, A.; Reichel, E.: The World Water Balance. R. Oldenbourg Verlag, München, 1975
5. Graßl, H.: Wolkenbildung durch die Emissionen hochfliegender Flugzeuge. In: Ökologische Folgen des Flugverkehrs, Tutzing Materialien Nr. 50/1988, Held, M. (Hrsg.), Evangelische Akademie Tutzing, 1988 a
6. nach Warneck, P.: Chemistry of the natural atmosphere. International Geophysics Series Band 41, Academic Press (ISBN-12-435 630-4), Orlando, San Diego, London, 1988
7. Harries, J.E.: The distribution of water vapor in the stratosphere. Rev. Geophys. Space Phys. Band 14, 1976, S. 565-575  
Elsaesser, H.W.; Harries, J.E.; Kley, D.; Penndorf, R.: Stratospheric  $\text{H}_2\text{O}$ . Planet. Space Sci. Band 28, 1980, S. 827-835  
World Meteorological Organisation (WMO): The Stratosphere 1981 — Theory and Measurements. WHO Global Ozone Research and Monitoring Project, Report Nr. 11, Genf, 1982
8. Keeling, C.D.; Heimann, M.: Meridional eddy diffusion model of the transport of atmospheric carbon dioxide. — 2. Mean annual carbon cycle. J. Geophys. Res. Band 91, 1986, S. 7782-7798  
Keeling, C.D. u. a.: A three dimensional model of atmospheric  $\text{CO}_2$  transport based on observed winds: 1. Analysis of observational data. In „Aspects of climate variability in the Pacific and the Western Americas“, Peterson, D.H. (Hrsg.), Geophys. Monograph Band 55, AGU, Washington (USA), 1989, S. 165-236  
Pearman, G.I.; Hyson, P.: Global transport and inter-reservoir exchange of carbon dioxide with particular reference to stable isotope distribution. J. Atmos. Chem. Band 4, 1986, S. 81-124  
Conway, T.J. u. a.: Atmospheric carbon dioxide measurements in the remote global troposphere, 1981-1984. Tellus Band 40B, 1988, S. 81-115
9. Thompson, M.L.; Enting, G.; Pearman, G.I.; Hyson, P.: Interannual variation of atmospheric  $\text{CO}_2$  concentration. J. Atmos. Chem. Band 4, 1986, S. 125-155  
Keeling u. a., 1989 a
10. Feely, R.A. u. a.: Distribution of chemical tracers in the Eastern Equatorial Pacific during and after the 1982-1983 El-Niño/Southern Oscillation event. J. Geophys. Res. Band 92, 1987, S. 6545-6558  
Keeling u. a., 1989 a
11. Bolin, B.: How much  $\text{CO}_2$  will remain in the atmosphere? In „The Greenhouse Effect, Climatic Change and Ecosystems“. SCOPE 29, Bolin, B.; Döös, B.R.; Jäger, J.; Warrick, R.A. (Hrsg.), John Wiley and Sons, Chichester, England, 1986, S. 93-155  
Bolin, B.: Carbon cycle modelling. SCOPE 16, John Wiley and Sons, 1981
12. Trabalka, J.R. (Hrsg.): Atmospheric carbon dioxide and the global carbon cycle. U.S. Department of Energy, DOE/ER0239, Washington, D.C., 1985  
Siegenthaler, U.: Carbon dioxide: it's natural cycle and anthropogenic perturbations. In „The Role of Air-Sea Exchange in Geochemical Cycling“, Buat-Menard, P. (Hrsg.), Reidel Publ. Co., 1986, S. 209-247
13. Enquete-Kommission „Vorsorge zum Schutz der Erdatmosphäre“, 1988
14. Enquete-Kommission „Vorsorge zum Schutz der Erdatmosphäre“: Schutz der tropischen Wälder. Eine internationale Schwerpunktaufgabe. In: Zur Sache. Themen parlamentarischer Beratung. Deutscher Bundestag, Bonn, 1990
15. Myers, N.: Deforestation Rates in Tropical Forests and their Climatic Implications. A Friends of the Earth Report, London, 1989
16. Houghton, R.A.; Schlesinger, W.H.; Brown, S.; Richards, J.F.: Carbon dioxide exchange between the atmosphere



- and terrestrial ecosystems. In „Atmospheric Carbon Dioxide and the Global Carbon Cycle“, Trabalka, J.R. (Hrsg.), U.S. Department of Energy, DOE/ER-0239, Washington, D.C. (USA), 1985b
17. Eppley, R.W.; Peterson, B.J.: Particulate organic matter flux and planktonic new production in the deep ocean. *Nature* Band 282, 1979, S. 677-680
  18. Fraser, P.J.; Khalil, M.A.K.; Rasmussen, R.A.; Steele, L.P.: Tropospheric methane in the mid-latitudes of the southern hemisphere. *J. Atmos. Chem.* Band 1, 1984, S. 125-135  
 Steele, L.P. u. a.: The global distribution of methane in the troposphere. *J. Atmos. Chem.* Band 5, 1987, S. 125-171  
 Blake, D.R.; Rowland, F.S.: Continuing world-wide increase in tropospheric methane, 1978-1987. *Science* Band 239, 1988, S. 1129-1131  
 Brunke, E.-G.; Scheel, H.E.; Seiler, W.: Trends of tropospheric CO, N<sub>2</sub>O and CH<sub>4</sub> as observed at Cape Point, South Africa. *Atmos. Environ.* Band 24A, 1990, S. 585-595
  19. Brunke u. a., 1990
  20. Brunke u. a., 1990
  21. Khalil, M.A.K.; Rasmussen, R.A.: Interannual variability of atmospheric methane: Possible effects of the El-Niño/Southern Oscillation. *Science* Band 232, 1986, S. 56-58
  22. nach Brunke u. a., 1990
  23. Cicerone, R.; Oremland, R.: Biogeochemical aspects of atmospheric methane. *Global Biogeochem. Cycles* Band 2, 1988, S. 299-327  
 Wahlen, M. u. a.: Carbon-14 in methane sources and in atmospheric methane: Contribution from fossil carbon. *Science* Band 245, 1989, 286 – 290.
  24. Holzapfel-Pschorn, A.; Seiler, W.: Methane emission during a cultivation period from an Italian rice paddy. *J. Geophys. Res.* Band 91, 1986, S. 11803-11814  
 Neue, H.H.; Scharpenseel, H.W.: Gaseous products of decomposition of organic matter in submerged soils. In „Organic matter and Rice“, *Int. Rice Res. Inst., Los Banos, Philippinen*, 1984, S. 311-328  
 Schütz, H.; Holzapfel-Pschorn, A.; Conrad, R.; Rennenberg, H.; Seiler, W.: A 3-year continuous record on the influence of daytime, season, and fertilizer treatment on methane emission rates from an Italian rice paddy. *J. Geophys. Res.* Band 94, 1989, S. 16405-16416
  25. Crutzen, P.J.; Aselmann, I.; Seiler, W.: Methane production by domestic animals, wild ruminants, other herbivorous fauna, and humans. *Tellus* Band 38B, 1986, S. 271-284  
 Lerner, J.; Mathews, G.; Fung, I.: Methane emissions from animals. A global high-resolution data base. *Global Biogeochem. Cycles* Band 2, 1988, S. 139-156
  26. Bingemer, H.G.; Crutzen, P.J.: The production of methane from solid wastes. *J. Geophys. Res.* Band 92, 1987, S. 2181-2187
  27. Crutzen, P.J.; Heidt, L.E.; Krasnec, J.P.; Pollock, W.H.; Seiler, W.: Biomass burning as a source of atmospheric gases CO, H<sub>2</sub>, N<sub>2</sub>O, NO, CH<sub>3</sub>Cl, and COS. *Nature* Band 282, 1979, S. 253-256
  28. nach Rasmussen, R.A.; Khalil, M.A.K.: Atmospheric methane in the recent and ancient atmospheres concentrations, trends and interhemispheric gradient. *J. Geophys. Res.* Band 89, 1984, S. 11599-11605  
 und Robbins, R.C.; Cavanagh, L.A.; Salas, L.J.; Robinson, E.: Analysis of ancient atmospheres. *J. Geophys. Res.* Band 78, 1973, S. 5341-5344
  - sowie Craig, H.; Chou, C.C.: Methane: The record in polar ice cores. *Geophys. Res. L.* Band 9, 1982, S. 1221-1224
  29. Svensson, B.H.; Rosswall, T.: In-situ methane production from acid peat in plant communities with different moisture regimes in a subarctic mire. *Oikos* Band 43, 1984, S. 341-350  
 Sebacher, D.I.; Harriss, R.C.; Bartlett, K.B.; Sebacher, S.M.; Grice, S.S.: Atmospheric methane sources: Alaskan tundra bogs, an alpine fen, and a subarctic boreal marsh. *Tellus* Band 38B, 1986, S. 1-10  
 Mathews, G.; Fung, I.: Methane emissions from natural wetlands: Global distribution, area and environment of characteristic sources. *Global Biogeochem. Cycles*, Band 1, 1987, S. 61-86  
 Whalen, S.C.; Reeburgh, W.S.: A methane flux times series for tundra environments. *Global Biogeochem. Cycles* Band 2, 1988, S. 399-410  
 Crill, P.M. u. a.: Methane flux from Minnesota peatlands. *Global Biogeochem. Cycles* Band 2, 1988, S. 371-384  
 Burke, R.A.; Barber, T.R.; Sackett, W.M.: Methane flux and stable hydrogen and carbon isotope composition of sedimentary methane from the Florida Everglades. *Global Biogeochem. Cycles* Band 2, 1988, S. 329-340  
 Harriss, R.C.; Sebacher, D.I.; Bartlett, K.B.; Bartlett, D.S.; Crill, P.M.: Sources of atmospheric methane in the South Florida environment. *Global Biogeochem. Cycles* Band 2, 1988, S. 231-244  
 Aselmann, I.; Crutzen, P.J.: Freshwater wetlands: Global distribution of natural wetlands and rice paddies, their net primary productivity, seasonality, and possible methane emissions, 1990, *Manuskript in Vorbereitung*
  30. Kvenvolden, K.A.: Methane hydrates and global climate. *Global Biogeochem. Cycles* Band 2, 1988, S. 221-230
  31. Revelle, R.R.: Methane hydrates in continental slope sediments and increasing atmospheric carbon dioxide. In „Changing Climates“, National Academy Press, Washington, D.C. (USA), 1983, S. 252-261
  32. Crutzen, P.J.: Role of the tropics in atmospheric chemistry. In „The Geophysics of Amazonia“, Dickinson, R.E. (Hrsg.), John Wiley, New York, 1987, S. 107-130
  33. Bolle, H.-J.; Seiler, W.; Bolin, B.: Other greenhouse gases and aerosols. — Assessing their role for atmospheric radiative transfer. In „The Greenhouse Effect, Climate Change, and Ecosystems“. *SCOPE* 29, Bolin, B.; Döös, B.R.; Jäger, J.; Warrick R.A. (Hrsg.), John Wiley and Sons, New York, 1986, S. 157-203
  34. Stuedler, P.A.; Bowden, R.D.; Melillo, J.M.; Aber, J.D.: Influence of nitrogen fertilization on methane uptake in temperate forest soils. *Nature* Band 341, 1989, S. 314-316
  35. Prinn, R. u. a.: Atmospheric trends in methylchloroform and the global average for the hydroxyl radical. *Science* Band 238, 1987, S. 945-950
  36. Wahlen u. a., 1989
  37. Rasmussen, R.A.; Khalil, M.A.K.: Atmospheric trace gases: Trends and distributions over the last decade. *Science* Band 232, 1986, S. 1623-1624  
 Robinson, E. u. a.: Long-term air quality monitoring at the South Pole by the NOAA program Geophysical Monitoring for Climate Change. *Rev. Geophys.* Band 26, 1988, S. 63-80  
 Prinn, R. u. a.: Atmospheric trends and emissions of nitrous oxide deduced from ten years of ALE-GAGE data. *J. Geophys. Res.*, 1990, im Druck
- Brunke u. a., 1990

38. Seiler, W.; Conrad, R.: Field measurements of natural and fertilizer-induced  $N_2O$  release rates from soil. *J. Air Poll. Control Assoc.* Band 31, 1981, S. 767-772
- Conrad, R.; Seiler, W.; Bunse G.: Factors influencing the loss of fertilizer-nitrogen into the atmosphere as  $N_2O$ . *J. Geophys. Res.* Band 88, 1983, S. 6709-6718
- Slemr, F.; Conrad, R.; Seiler, W.:  $N_2O$  emissions from fertilized and unfertilized soils in a subtropical region (Andalusia/Spain). *J. Atmos. Chem.* Band 1, 1984, S. 159-169
- Keller, M.; Kaplan, W.A.; Wofsy, S.C.: Emissions of  $N_2O$ ,  $CH_4$ , and  $CO_2$  from tropical soils. *J. Geophys. Res.* Band 91, 1986, S. 11791-11802
- Matson, P.A.; Vitousek, P.M.: Cross-system comparisons of soil nitrogen transformations and nitrous oxide flux in tropical forest ecosystems. *Global Biogeochem. Cycles* Band 1, 1987, S. 163-170
- Robertson, G.P.; Tiedje, J.M.: Deforestation alters denitrification in a lowland tropical rain forest. *Nature* Band 336, 1988, S. 756-759
- Ronen, D.; Mordechai, M.; Almon, E.: Contaminated aquifers are a forgotten component of the global  $N_2O$  budget. *Nature* Band 335, 1988, S. 57-59
- Luizao, F.; Matson, P.; Livingston, G.; Luizao, R.; Vitousek, P.: Nitrous oxide flux following tropical land clearing. *Global Biogeochem. Cycles*, 1990, im Druck
- Schmidt, J.; Seiler, W.; Conrad, R.: Emission of nitrous oxide from temperate forest soils into the atmosphere. *J. Atmos. Chem.* Band 6, 1988, S. 95-115
39. McElroy, M.B.; Wofsy, S.C.: Tropical forests: Interactions with the atmosphere. In „Tropical Rain forests and the World Atmosphere“, AAAS Selected Symposium 101, Prance, G.T. (Hrsg.), Westview Press, Inc., Boulder, Colorado (USA), 1986, S. 33-60
- Butler, J.H.; Elkins, J.W.; Thompson, T.M.; Egan, K.B.: Tropospheric and dissolved  $N_2O$  of the West Pacific and East Indian oceans during the El-Niño/Southern Oscillation event of 1987. *J. Geophys. Res.*, 1990, im Druck
- Conrad u. a., 1983
- Ronen u. a., 1988
40. Seiler, W.; Conrad, R.: Contribution of tropical ecosystems to the global budgets of trace gases, especially  $CH_4$ ,  $H_2$ ,  $CO$ , and  $N_2O$ . In „The Geophysiology of Amazonia“, Dickinson, R.E. (Hrsg.), John Wiley and Sons, New York, 1987, S. 133-160
- Keller u. a., 1986
41. Hao, W.M.; Wofsy, S.C.; McElroy, M.B.; Beer, J.M.; Togan, M.A.: Sources of atmospheric nitrous oxide from combustion. *J. Geophys. Res.* Band 92, 1987, S. 3098-3104
42. Muzio, L.J.; Kramlich, J.C.: An artifact in the measurement of  $N_2O$  from combustion sources. *Geophys. Res. L.* Band 15, 1988, S. 1369-1372
43. Weiss, R.F.: The temporal and spatial distribution of tropospheric nitrous oxide. *J. Geophys. Res.* Band 86, 1981, S. 7185-7195.
- McElroy und Wofsy, 1986
44. Cicerone, R.J.: Analysis of sources and sinks of atmospheric nitrous oxide ( $N_2O$ ). *J. Geophys. Res.* Band 94, 1989, S. 18265-18271
45. Hartmann, D.; Rösner, I.; Zellner, R.; 1990, zu veröffentlichen
46. Zellner und Weibring, 1990
47. Metz, N.: Personenwagen-Abgasemissionen im Spurenbereich. *Automobiltechnische Zeitschrift* Band 84, 1984, S. 1-6
48. Crutzen u. a., 1979
49. Fabian, P.; Pruchniewicz, P.G.: Meridional distribution of ozone in the troposphere and its seasonal variations. *J. Geophys. Res.* Band 82, 1977, S. 2063-2073
- Levy, H.; Mahlman, J.D.; Moxim, W.J.; Liu, S.C.: Tropospheric ozone: The role of transport. *J. Geophys. Res.* Band 90, 1985, S. 3753-3772
- Logan, J.A.: Tropospheric ozone: Seasonal behavior, trends, and anthropogenic influence. *J. Geophys. Res.* Band 90, 1985, S. 10463-10482
50. Delany, A.C.; Crutzen, P.J.; Haagenson, P.; Walters, S.; Wartburg, A.F.: Photochemically produced ozone in the emissions from large-scale tropical vegetation fires. *J. Geophys. Res.* Band 90, 1985, S. 2425-2429
- Crutzen, P.J. u. a.: Tropospheric chemical composition measurements in Brazil during the dry season. *J. Atmos. Chem.* Band 2, 1985, S. 233-256
- Logan J.A.; Kirchhoff, V.W.J.H.: Seasonal variations of tropospheric ozone at Natal, Brazil. *J. Geophys. Res.* Band 91, 1986, S. 7875-7881
- Fishman, J.; Watson, C.E.; Larsen, J.C.; Logan, J.A.: The distribution of tropospheric ozone obtained from satellite data. *J. Geophys. Res.*, 1990, im Druck
51. Fishman u. a., 1990
52. Liu, S.C.; McFarland, M.; Kley, D.; Zafiriou, O.; Huebert, B.J.: Tropospheric  $NO_x$  and  $O_3$  budgets in the equatorial Pacific. *J. Geophys. Res.* Band 88, 1983, S. 1360-1368
- Gregory, G.L.; Browell, E.V.; Warren, L.S.: Boundary layer ozone: An airborne survey above the Amazon Basin. *J. Geophys. Res.* Band 93, 1988, S. 1452-1468
- Kirchhoff, V.W.J.H.; Setzer, A.W.; Pereira, M.C.: Biomass burning in Amazonia: Seasonal effects on atmospheric  $O_3$  and  $CO$ . *Geophys. Res. L.* Band 16, 1989a, S. 469-472
- Jacob, D.J.; Wofsy, S.C.: Budgets of reactive nitrogen, hydrocarbons and ozone over the Amazon forest during the wet season. *J. Geophys. Res.*, 1990, Manuskript eingereicht
- Kirchhoff, V.W.J.H.: Ozone measurements in Amazonia: Dry versus wet season. *J. Geophys. Res.*, 1990, Manuskript eingereicht
- Winkler, P.: Meridionalverteilung des bodennahen Ozons über dem Atlantik. *Ann. Meteorol.* Band 15, 1980, S. 241-242
53. Hough, A.M.; Derwent, R.G.: Changes in the global concentration of tropospheric ozone due to human activities. *Nature* Band 344, 1990, S. 645-648
- Danielsen, E.F.; Mohnen, V.A.: Project Dustorm report: Ozone transport, in situ measurements, and meteorological analyses of tropopause folding. *J. Geophys. Res.* Band 82, 1977, S. 5867-5878
- Gidel, L.T.; Shapiro, M.A.: General circulation model estimates of the net vertical flux of ozone in the lower stratosphere and the implications for the tropospheric ozone budget. *J. Geophys. Res.* Band 85, 1980, S. 4049-4058
- Vaughan, G.: Stratosphere-Troposphere exchange of ozone. In „Tropospheric Ozone — Regional and Global Scale Interactions“. Isaksen, I.S.A. (Hrsg.), NATO ASI Series C, Band 227, Reidel Publishing Comp., Dordrecht, Holland, 1988, S. 125-135
54. Fishman, J.; Solomon, S.; Crutzen, P.J.: Observational and theoretical evidence in support of a significant in situ photochemical source of tropospheric ozone. *Tellus* Band 31, 1979, S. 432-446

- Crutzen, P.J.: A discussion of the chemistry of some minor constituents in the stratosphere and troposphere. *Pure Appl. Geophys.* Band 106 – 108, 1973, S. 1385-1399
- Crutzen, P.J.: Photochemical reactions initiated by and influencing ozone in unpolluted tropospheric air. *Tellus* Band 26, 1974, S. 47-57
55. Crutzen, P.J.: Tropospheric ozone: an overview. In „Tropospheric Ozone – Regional and Global Scale Interactions“. Isaksen, I.S.A. (Hrsg.), NATO ASI Series C Band 227, Reidel Publishing Comp., Dordrecht, Holland, 1988, S. 3-32
56. Crutzen, 1988
57. Isaksen, I.S.A.: Is the oxidizing capacity of the atmosphere changing? In „The Changing Atmosphere“, Rowland, F.S.; Isaksen, I.S.A. (Hrsg.), Dahlem Konferenzen, Bernhardt, S.; John Wiley and Sons, Chichester, England, 1988, S. 141-157
58. Crutzen, 1988
59. Galbally, I.E.; Roy, C.R.: Destruction of ozone at the earth's surface. *Quart. J. Roy. Meteorol. Soc.* Band 106, 1980, S. 599-620
- Lenschow, D.H.; Pearson, R., Jr.; Stankov, B.B.: Measurements of ozone vertical flux to ocean and forest. *J. Geophys. Res.* Band 87, 1982, S. 8833-8837
- Fishman, J.: Ozone in the troposphere. In „Ozone in the Free Atmosphere“, Kapitel 4. Whitten, R.S.; Prasad, S.S. (Hrsg.), van Nostand, New York, 1985, S. 161-194
60. nach Hough und Derwent, 1990
61. Seiler, W.; Junge, C.: Carbon monoxide in the atmosphere. *J. Geophys. Res.* Band 75, 1970, S. 2217-2226
- Seiler, W.: The cycle of atmospheric CO. *Tellus* Band 26, 1974, S. 116-135
- Heidt, L.E. u. a.: Latitudinal distribution of CO and CH<sub>4</sub> over the Pacific. *J. Geophys. Res.* Band 85, 1980, S. 7329-7338
- Seiler, W.; Fishman, J.: The distribution of carbon monoxide and ozone in the free troposphere. *J. Geophys. Res.* Band 86, 1981, S. 7255-7265
- Seiler, W.; Giehl, H.; Brunke, E.-G.; Halliday, E.: The seasonality of CO abundance in the Southern Hemisphere. *Tellus* Band 36 B, 1984, S. 219-231
- Khalil, M.A.K.; Rasmussen, R.A.: Carbon monoxide in the Earth's atmosphere: Increasing trend. *Science* Band 224, 1984, S. 54-56
- Khalil, M.A.K.; Rasmussen, R.A.: Carbon monoxide in the Earth's atmosphere: Indications of a global increase. *Nature* Band 332, 1988 a, S. 242-245
- Fraser, P.J.; Hyson, P.; Rasmussen, R.A.; Crawford, A.J.; Khalil, M.A.K.: Methane, carbon monoxide and methylchloroform in the Southern Hemisphere. *J. Atmos. Chem.* Band 4, 1986 a, S. 3-42
- Fraser, P.J. u. a.: Carbon monoxide in the Southern Hemisphere. *Proc. 7th World Clean Air Congr.*, Band 2, 1986 b, S. 341-352
- Reichle, H.G., Jr. u. a.: Carbon monoxide measurements in the troposphere. *Science* Band 218, 1982, S. 1024-1026
- Reichle, H.G., Jr. u. a.: The distribution of middle tropospheric carbon monoxide during early October 1990. *J. Geophys. Res.*, 1990, im Druck
- Newell, R.E.; Reichle, H.G., Jr.; Seiler, W.: Carbon monoxide and the burning Earth. *Scientif. American*, Oktober 1989, S. 82-88
- Zander, R.; Demmoulin, Ph.; Ehhalt, D.H.; Schmidt, U.; Rinsland, C.P.: Secular increases in the total vertical abundance of carbon monoxide above Central Europe since 1950. *J. Geophys. Res.* Band 94, 1989 b, S. 11021-11028
- Kirchhoff, V.W.J.H.; Marimho, E.V.A.: A survey of continental concentrations of atmospheric CO in the Southern Hemisphere. *Atmos. Environ.* Band 23, 1989 b, S. 461-466
62. Brunke u. a., 1990
63. Seiler u. a., 1984
64. Bauer, K.; Conrad, R.; Seiler, W.: Photooxidative production of carbon monoxide by phytotrophic microorganisms. *Biochem. Biophys. Acta* Band 589, 1980, S. 46-55
- Logan, J.A.; Prather, M.J.; Wofsy, S.C.; McElroy, M.B.: Tropospheric chemistry: A global perspective. *J. Geophys. Res.* Band 86, 1981, S. 7210-7254
- Conrad, R.; Seiler, W.: Arid soils as a source of atmospheric carbon monoxide. *Geophys. Res. L.* Band 9, 1982, S. 1353-1356
65. Jaffe, L.S.: Ambient carbon monoxide and its fate in the atmosphere. *J. Air Pollut. Contr. Assoc.* Band 18, 1968, S. 534-540
- Jaffe, L.S.: Carbon monoxide in the biosphere: Sources, distribution, and concentrations. *J. Geophys. Res.* Band 78, 1973, S. 5293-5305
- Swinnerton, J.W.; Lamontagne, R.A.; Linnenbom, V.J.: Carbon monoxide in rainwater. *Science* Band 172, 1971, S. 943-945
- Seiler, 1974
66. Crutzen u. a., 1979
67. McConnell, J.C.; McElroy, M.B.; Wofsy, S.C.: Natural Sources of atmospheric CO. *Nature* Band 233, 1971, S. 605-608
- Wofsy, S.C.; McConnell, J.C.; McElroy, M.B.: Atmospheric CH<sub>4</sub>, CO and CO<sub>2</sub>. *J. Geophys. Res.* Band 77, 1972, S. 4477-4493
- Zimmerman, P.R.; Chatfield, R.B.; Fishman, J.; Crutzen, P.J.; Hanst, P.L.: Estimates on the production of CO and H<sub>2</sub> from the oxidation of hydrocarbon emissions from vegetation. *Geophys. Res. L.* Band 5, 1978, S. 679-682
- Greenberg, J.P.; Zimmerman, P.R.; Chatfield, R.B.: Hydrocarbons and carbon monoxide in African savannah air. *Geophys. Res. L.* Band 12, 1985, S. 113-116
- Logan u. a., 1981
68. McConnell u. a., 1971
69. Wofsy u. a., 1972
70. Crutzen, P.J.; Gidel, L.T.: A two-dimensional photochemical model of the atmosphere. – 2: The tropospheric budgets of the anthropogenic chlorocarbons, CO, CH<sub>4</sub>, CH<sub>3</sub>Cl and the effects of various NO<sub>x</sub> sources on tropospheric ozone. *J. Geophys. Res.* Band 88, 1983, S. 6641-6661
71. Seiler, W.; Schmidt, U.: Dissolved nonconservative gases in seawater. In „The Sea“, Band 5, Goldberg, E.D. (Hrsg.), John Wiley and Sons, New York, 1974, S. 219-243
- Bartholomew, G.W.; Alexander, M.: Soil as a sink of atmospheric carbon monoxide. *Science* Band 212, 1981, S. 1389-1391
- Conrad, R.; Seiler, W.: Influence of temperature, moisture, and organic carbon on the flux of H<sub>2</sub> and CO between soil and atmosphere: field studies in subtropical regions. *J. Geophys. Res.* Band 90, 1985, S. 5633-5709

72. Crutzen, P.J.: The role of NO and NO<sub>2</sub> in the chemistry of the troposphere and stratosphere. *Ann. Rev. Earth Planet. Sci.* Band 7, 1979, S. 443-472
73. Fehsenfeld, F.C.; Parrish, D.W.; Fahey, D.W.: The measurements of NO<sub>x</sub> in the nonurban troposphere. In „Tropospheric ozone: Regional and global scale interactions“. Isaksen, I.S.A. (Hrsg.), D. Reidel Publishing Co., Boston, Massachusetts, 1988, S. 185-217
74. Logan, J.A.: Nitrogen oxides in the troposphere: Global and regional budgets. *J. Geophys. Res.* Band 88, 1983, S. 10785-10807
75. vgl. Böttger, A.; Ehhalt, D.H.; Gravenhorst, G.: Atmosphärische Kreisläufe von Stickoxiden und Ammoniak. KFA-Report 1558, 1978
- Ehhalt, D.H.; Drummond, J.W.: NO<sub>x</sub> sources and the tropospheric distribution of NO<sub>x</sub> during STRATOZ III. In: „Tropospheric Ozone“, Isaksen, I.S.A. (Hrsg.). D. Reidel Publ. Comp., Dordrecht, Holland, 1988, S. 217-237
- Ehhalt, D.H.; Drummond, J.W.: The tropospheric cycle of NO<sub>x</sub>. In „Chemistry of the Unpolluted and Polluted Troposphere“. Georgii, H.W.; Jaeschke, W. (Hrsg.), D. Reidel, Hingham, Massachusetts, USA, 1982, S. 219-251
- Logan, 1983
76. nach Galbally, I.E.: Factors controlling NO<sub>x</sub> emissions from soils. In „Exchange of trace gases between terrestrial ecosystems and the atmosphere“. John Wiley and Sons, New York, 1989, S. 23-27
- und anderen im Text genannten Autoren
77. Ehhalt und Drummond, 1982
- Logan, 1983
78. Crutzen u. a., 1979
- Crutzen u. a., 1985
79. Slemr, F.; Seiler, W.: Field measurements of NO and NO<sub>2</sub> emissions from fertilized and unfertilized soils. *J. Atmos. Chem.* Band 2, 1984, S. 1-24
80. Slemr und Seiler, 1984
81. Galbally und Roy, 1980
82. Noxon, J.F.: Tropospheric NO<sub>2</sub>. *J. Geophys. Res.* Band 83, 1978, S. 3051-3057
- Chameides u. a., 1987
83. Ehhalt und Drummond, 1988
84. Hahn, J.; Crutzen, P.J.: The role of fixed nitrogen in atmospheric photochemistry. *Phil. Trans. R. Soc. (London)*, Band B 296, 1982, S. 521-541
85. Böttger u. a., 1979
86. Atlas, E.: Evidence for C3 alkyl nitrates in rural and remote atmospheres. *Nature* Band 331, 1988, S. 426-428
- Becker, K.H.; Wirtz, K.: Gas phase reactions of alkyl nitrates with hydroxyl radicals under tropospheric conditions in comparison with photolysis. *J. Atmos. Chem.* Band 9, 1989, S. 419-433
- Crutzen, 1979
87. Crutzen, 1979
88. Hahn, J.; Matuska, P.: Nonmethane hydrocarbon measurements at two mountain stations in the Bavarian alps. *Proc. Symp. COST 611, Working Group 3 „Field measurements and their interpretation“*, held at C.I.E.M.A.T., Madrid, Spain, Millan, M.M. (Hrsg.), 1990, im Druck
89. Hahn und Matuska, unveröffentlichte Daten
90. Hahn und Matuska, 1990
91. Singh, H.B.; Viezee, W.; Salas, L.J.: Measurements of selected C2-C5 hydrocarbons in the troposphere: Latitudinal, vertical, and temporal variations. *J. Geophys. Res.* Band 93, 1988, S. 15861-15878
- Rudolph, J.: Two-dimensional distribution of light hydrocarbons: Results from the STRATOZ III experiment. *J. Geophys. Res.* Band 93, 1988, S. 8367-8377
92. z. B. Dulson, W.: Organisch-chemische Fremdstoffe in atmosphärischer Luft. — Gaschromatographisch-massenspektrometrische Submikrobestimmung und Bewertung von Luftverunreinigungen in einer Großstadt. *Schriftenreihe des Vereins für Wasser-, Boden- und Lufthygiene*, Band 47, Heller, A. (Hrsg.), Gustav Fischer Verlag, Stuttgart, 1978, S. 1-128
- und Wathne, B.M.: Measurements of benzene, toluene and xylenes in urban air. *Atmos. Environ.* Band 17, 1983, S. 1713-1722
- sowie Aronian, P.F.; Scheff, P.A.; Wadden, R.A.: Winter-time source-reconciliation of ambient organics. *Atmos. Environ.* Band 23, 1989, S. 911-920
93. Cavanaugh, L.A.; Schadt, C.F.; Conrad, F.; Robinson, E.: Atmospheric hydrocarbon and carbon monoxide measurements at Point Barrow, Alaska. *Environ. Sci. Technol.* Band 3, 1969, S. 251-257
94. Neitzert, V.; Seiler, W.: Measurement of formaldehyde in clean air. *Geophys. Res. L.* Band 8, 1981, S. 79-82
- Lowe, D.C.; Schmidt, U.; Ehhalt, D.H.: The tropospheric distribution of formaldehyde. Report Nr. 1756, KFA Jülich, 1981
- Lowe, D.C.; Schmidt, U.: Formaldehyde (HCHO) measurements in the nonurban atmosphere. *J. Geophys. Res.* Band 88, 1983, S. 10858-10884
- Schubert, B.; Schmidt, U.; Ehhalt, D.H.: Sampling and analysis of acetaldehyde in tropospheric air. *Proc. 3rd European Symp. on Physico-chemical behaviour of Atmos. Pollutants*, Varese, Italy, April 1984, EUR. 9336, 1984, S. 44-52
- Snider, J.R.; Dawson, G.A.: Tropospheric light alcohols, carbonyls, and acetonitrile: Concentrations in the Southwestern United States and Henry's Law data. *J. Geophys. Res.* Band 90, 1985, S. 3797-3805
- Dawson, G.A.; Farmer, J.C.: Soluble atmospheric trace gases in the Southwestern United States. — 2. Organic Species HCHO, HCOOH, CH<sub>3</sub>COOH. *J. Geophys. Res.* Band 93, 1988, S. 5200-5206
95. Chatfield, R.B.; Gardner, E.P.; Calvert, J.G.: Sources and sinks of acetone in the troposphere: Behavior of reactive hydrocarbons and a stable product. *J. Geophys. Res.* Band 92, 1987, S. 4208-4216
96. Dawson, G.A.; Farmer, J.C.; Moyers, J.L.: Formic and acetic acids in the atmosphere of the Southwest USA. *Geophys. Res. L.* Band 7, 1980, S. 725-728
- Puxbaum, H. u. a.: Atmospheric concentrations of formic and acetic acids in eastern and northern Austria. *Atmos. Environ.* Band 22, 1988, S. 2841-2850
- Hartmann, W.R.; Andreae, M.O.; Helas, G.: Measurements of organic acids over Central Germany. *Atmos. Environ.* Band 23, 1989, S. 1531-1533
97. Altshuler, A.P.: Review: Natural volatile organic substances and their effect on air quality in the United States. *Atmos. Environ.* Band 17, 1983, S. 2131-2165
- Roberts, J.M.; Fehsenfeld, F.C.; Albritton, D.L.; Sievers, R.E.: Measurements of monoterpene hydrocarbons at Niwot Ridge, Colorado. *J. Geophys. Res.* Band 88, 1983, S. 10667-10678

- Isidorov, V.A.; Zenkevich, I.G.; Ioffe, B.V.: Volatile organic compounds in the atmosphere of forests. *Atmos. Environ.* Band 19, 1985, S. 1-8
- Gregory, G.L. u. a.: Air chemistry over the tropical forest of Guayana. *J. Geophys. Res.* Band 91, 1986, S. 8603-8612
98. Bonsang, B.; Kanakidou, M.; Lambert, G.; Monfray, P.: The marine source of C2-C6 aliphatic hydrocarbons. *J. Atmos. Chem.* Band 6, 1988, S. 3-20
99. Penkett, S.A.: Non-methane organics in the remote troposphere. In „Atmospheric Chemistry“, Goldberg E.D. (Hrsg.), Dahlem Konferenzen, Bernhard, S., Springer-Verlag, New York, 1982, S. 329-355
100. Rasmussen, R.A.; Khalil, M.A.K.: Isoprene over the Amazon basin. *J. Geophys. Res.* Band 93, 1988, S. 1417-1421
101. Hough, A.M.; Derwent, R.G.: Computer modelling studies of the distribution of photochemical ozone production between different hydrocarbons. *Atmos. Environ.* Band 21, 1987, S. 2015-2033
- Lin, X.; Trainer, M.; Liu, S.C.: On the nonlinearity of the tropospheric ozone production. *J. Geophys. Res.* Band 93, 1988, S. 15879-15888
- Lopez, A.; Barthomeuf, M.O.; Huertas, M.L.: Simulation of the chemical processes occurring in an atmospheric boundary layer. Influence of light and biogenic hydrocarbons on the formation of oxidants. *Atmos. Environ.* Band 23, 1989, S. 1465-1478
- Crutzen, 1988
102. Hense, A.; Krahe, P.; Flohn, H.: Recent fluctuations of tropospheric temperature and water vapour content. *Meteor. Atm. Physics* Band 38, 1988, S. 215-227
103. Trenberth, K.E.; Christy, J.R.; Olson, J.G.: Global atmospheric mass, surface pressure and water vapour variations. *J. Geophys. Res.* Band 92, 1987, S. 14815-14826
104. Flohn, H.: Treibhauseffekt der Atmosphäre: neue Fakten und Perspektiven. Leo-Brandt-Vortrag, 27. Sept. 1989, Rheinisch-Westfälische Akademie der Wissenschaften, Westdeutscher Verlag, Opladen, 1989
105. Elliott, W.P.; Smith, M.E.; Angell, J.K.: On monitoring tropospheric water vapour changes using radiosonde data. Proc. Workshop on Greenhouse Gas Induced Climate Change, Amherst, Massachusetts, Mai 1989, Elsevier, 1990, im Druck
106. nach Hense u. a., 1988
107. Flohn, 1989
108. nach Chappelaz, J.; Barnola, J.M.; Raynaud, D.; Korotkevich, Y.S.; Lorius, C.: Ice-core record of atmospheric methane over the past 160 000 years. *Nature* Band 345, 1990, S. 127-131
109. nach Neftel, A.; Moor, E.; Oeschger, H.; Stauffer, B.: Evidence from polar ice cores for the increase in atmospheric CO<sub>2</sub> in the past two centuries. *Nature* Band 315, 1985 a, S. 45-47
- und Friedli, H.; Loetscher, H.; Oeschger, H.; Siegenthaler, U.; Stauffer, B.: Ice core record of the <sup>13</sup>C/<sup>12</sup>C ratio of atmospheric CO<sub>2</sub> in the past two centuries. *Nature* Band 324, 1986, S. 237-238
110. Keeling u. a., 1989 a
111. Rotty, R.M.; Marland, G.: Production of CO<sub>2</sub> from fossil fuel burning by fuel type, 1860 – 1982. Report NDP-006, Carbon Dioxide Information Center, Oak Ridge National Laboratory, USA, 1986
112. Houghton, R.A.; Skole, D.L.: Changes in the global carbon cycle between 1700 and 1985. In „The Earth transformed by human action“, Turner, B.L. (Hrsg.), Cambridge University Press, 1990, im Druck
113. Myers, 1989
114. Sarmiento, J.,L.; Orr, J.C.; Siegenthaler, U.: A perturbation simulation of CO<sub>2</sub> uptake in an ocean general circulation model, 1990, Manuskript in Vorbereitung
115. Enting, I.G.; Mansbridge, J.V.: Seasonal sources and sinks of atmospheric CO<sub>2</sub>: Direct inversion of filtered data. *Tellus* Band 41 B, 1989, S. 111-126
- Keeling, C.D.; Piper, S.C.; Heimann, M.: A three dimensional model of atmospheric CO<sub>2</sub> transport based on observed winds: 4. Mean annual gradients and interannual variations. In „Aspects of climate variability in the Pacific and the Western Americas“, Peterson, D.H. (Hrsg.), Geophysical Monograph Band 55, AGU, Washington, D.C., 1989 b, S. 305-363
- Tans, P.P.; Conway, T.J.; Nakasawa, T.: Latitudinal distribution of sources and sinks of atmospheric carbon dioxide. *J. Geophys. Res.* Band 94, 1989, S. 5151-5172
116. Siegenthaler, U.; Oeschger, H.: Biospheric CO<sub>2</sub> emissions during the past 200 years reconstructed by deconvolution of ice core data. *Tellus* Band 39 B, 1987, S. 140-154
117. Maier-Reimer, E.; Hasselmann, K.: Transport and storage of CO<sub>2</sub> in the ocean – An inorganic ocean-circulation carbon cycle model. *Climate Dynamics* Band 2, 1987, S. 63-90
118. Lashof, D.A.; Tirpark, D.: Policy options for stabilizing global climate. Draft report to the U.S. Congress, Februar 1989
119. Raynaud, D. u. a.: Climatic and CH<sub>4</sub> cycle implications of glacial-interglacial CH<sub>4</sub> change in the Vostok ice core. *Nature* Band 333, 1988, S. 655-657
- Stauffer, B.; Lochbronner, E.; Oeschger, H.; Schwander, J.: Methane concentration in the glacial atmosphere was only half that of the preindustrial Holocene. *Nature* Band 332, 1988, S. 812-814
- Craig und Chou, 1982
- Chappelaz u. a., 1990
120. Khalil, M.A.K.; Rasmussen, R.A.; Shearer, M.J.: Trends of atmospheric methane during the 1960s and 1970s. *J. Geophys. Res.* Band 94, 1989, S. 18279-18288
- Khalil, M.A.K.; Rasmussen, R.A.: Atmospheric methane: Recent global trends. *Environ. Sci. Technol.* Band 24, 1990, S. 549-553
121. Bolle u. a., 1986
122. nach Bolle u. a. 1986
123. Bolle u. a., 1986
124. Khalil, M.A.K.; Rasmussen, R.A.: Causes of increasing methane: Depletion of hydroxyl radicals and the rise of emission. *Atmos. Environ.* Band 19, 1985, S. 397-400
- Thompson, A.M.; Cicerone, R.J.: Possible perturbations to atmospheric CO, CH<sub>4</sub>, and OH. *J. Geophys. Res.* Band 91, 1986, S. 10853-10864
- Isaksen, I.S.A.; Hov, O.: Calculation of trends in the tropospheric concentration of O<sub>3</sub>, OH, CH<sub>4</sub>, and NO<sub>x</sub>. *Tellus* Band 39 B, 1987, S. 271-285
- Wuebbles, D.J.; Grant, K.E.; Connell, P.S.; Penner, J.E.: The role of atmospheric Chemistry in climate change. *J. Air Poll. Control Assoc.*, Band 39, 1989, S. 22-28
- Isaksen, 1988
125. Lashof und Tirpark, 1989
126. Khalil, M.A.K.; Rasmussen, R.A.: Nitrous oxide: Trends and global mass balance over the last 3000 years. *Ann. Glaciology* Band 10, 1988 b, S. 73-79

- Etheridge, D.M.; Pearmann, G.I.; de Silva, F.: Atmospheric trace gas variations as revealed by air trapped in an ice core from Law Dome, Antarctica. *Ann. Glaciology* Band 10, 1988, S. 28-33
- Zardini, D.; Raynaud, D.; Scharffe, D.; Seiler, W.: N<sub>2</sub>O measurements of air extracted from Antarctic ice cores: Implications of atmospheric N<sub>2</sub>O back to the last glacial-interglacial transition. *J. Atmos. Chem.* Band 8, 1989, S. 189-201
- Pearman, G.I.; Etheridge, D.; de Silva, F.; Fraser, P.J.: Evidence of changing concentrations of atmospheric CO<sub>2</sub>, N<sub>2</sub>O and CH<sub>4</sub> from air bubbles in Antarctic ice. *Nature* Band 320, 1986, S. 248-250
127. Elkins, J.W.; Rosen, R.: Summary report 1988: Geophysical monitoring for climatic change. NOAA-ERL, Boulder, Colorado, 1989
- Prinn, R. u. a.: Atmospheric trends and emissions of nitrous oxide deduced from ten years of ALE-GAGE data. *J. Geophys. Res.*, 1990, im Druck
- Rasmussen und Khalil, 1986
- Robinson u. a., 1988
128. Luizao u. a., 1990
129. Goreau, T.J.; de Mello, W.Z.: Tropical deforestation: Some effects on atmospheric chemistry. *Ambio* Band 17, 1988, S. 275-281
- Sanhueza, E.; Hao, W.M.; Scharffe, D.; Donoso, L.; Crutzen, P.J.: N<sub>2</sub>O and NO<sub>x</sub> emissions from soils in the northern part of the Guayana shield, Venezuela. *J. Geophys. Res.*, 1990, Manuskript eingereicht
130. Lashof und Tirpark, 1989
131. Prinn, R. u. a.: The atmospheric lifetime experiment, 1. Introduction, instrumentation and overview. *J. Geophys. Res.* Band 88, 1983, S. 5547-5566
- Cunnold, D. u. a.: The atmospheric lifetime experiment, 3. Lifetime methodology and application to three years of CFC<sub>3</sub> data. *J. Geophys. Res.* Band 88, 1983, S. 8379-8400
- World Meteorological Organisation (WMO): Atmospheric ozone 1985: Assessment of our understanding of the processes controlling its present distribution and change. WMO Global Ozone Research and Monitoring Project. Report Nr. 16, WMO, Genf, 1986
- World Meteorological Organisation (WMO): Report of the NASA/WMO ozone trends panel, 1989. Global Ozone research and Monitoring Project, Report Nr. 18, WMO, Genf, 1989a
- World Meteorological Organisation (WMO): Scientific assessment of stratospheric ozone, 1989. Global Ozone research and Monitoring Project, Report Nr. 20, WMO, Genf, 1989b
132. Rinsland, C.P.; Johnson, D.W.; Godman, A.; Levine, J.S.: Evidence for a decline in the atmospheric accumulation rate of CHClF<sub>2</sub> (CFC-22). *Nature* Band 337, 1989, S. 535-537
133. Lashof und Tirpark, 1989
134. Volz-Thomas, A.; Kley, D.: Ozone measurements in the 19th century: An evaluation of the Montsouris series. *Nature* Band 332, 1988, S. 240-242
135. vgl. Feister, U.; Warmbt, W.: Long-term measurements of surface ozone in the German Democratic Republic. *J. Atmos. Chem.* Band 5, 1987, S. 1-21
- und Attmannspacher, W.; Hartmannsgruber, R.; Lang, P.: Langzeittendenzen des Ozons der Atmosphäre aufgrund der 1967 begonnenen Meßreihe am Meteorologischen Observatorium Hohenpeißenberg. *Meteorol. Rundschau* Band 37, 1984, S. 193-199
136. vgl. Logan, 1985
- und Bojkov, R.D.: Ozone changes at the surface and in the free troposphere. In: *Tropospheric ozone*. Isaksen, I.S.A. (Hrsg.). NATO ASI, Series C, Band 227, Reidel Publishing Comp., Dordrecht, 1988, S. 83-96
137. Crutzen, 1988
138. Bojkov, 1988
139. Logan, 1985
140. Attmannspacher u. a., 1984
141. Scheel, H.E.; Brunke, E.G.; Seiler, W.: Trace gas measurements at the monitoring station Cape Point, South Africa, between 1978 and 1988. *J. Atmos. Chem.* Band 11, 1990, im Druck
142. Khalil und Rasmussen, 1988 a
143. Rinsland, C.P.; Levine, J.S.: Free tropospheric carbon monoxide concentrations in 1950 and 1951 deduced from infrared total column amount measurements. *Nature* Band 318, 1985, S. 250-254
144. Zander u. a. 1989 b
145. Dianov-Klokov, V.I.; Fokeeva, E.V.; Yurganov, Y.L.: The investigation of the abundance of atmospheric carbon monoxide. *Proc. Acad. Sci., UdSSR*, Band 14, 1978, S. 366-377
146. Dvoryashina, E.V.; Dianov-Klokov, V.I.; Yurganov, Y.L.: Ergebnisse von Messungen der Verteilung von Kohlenmonoxid bei Svenigorod, 1970 — 1982. Vorabdruck der Akademie der Wissenschaften der UdSSR, Moskau, 1982 (in Russisch)
- Dvoryashina, E.V.; Dianov-Klokov, V.I.; Yurganov, Y.L.: Über die Variationen der atmosphärischen Gesamtsäulendichte von Kohlenmonoxid für 1970 — 1982. *Iswestia, UdSSR, Atmosphärische und Ozeanische Physik* Band 20, 1984, S. 40-47 (in Russisch)
147. Brunke u. a., 1990
- Scheel u. a., 1990
148. Dignon, J.; Hameed, S.: Global emissions of nitrogen and sulphur oxides from 1860 to 1980. *J. Air Pollut. Contr. Assoc.* Band 39, 1989, S. 180-186
149. Neffel, A. u. a.: Sulfate and nitrate concentrations in snow from South Greenland 1895 — 1978. *Nature* Band 314, 1985 b, S. 611-613
150. Wagenbach, D.; Münnich, K.O.; Schotterer, U.; Oeschger, H.: The anthropogenic impact on snow chemistry at Colle Gnifetti, Swiss Alps. *Ann. Glaciology* Band 10, 1988, S. 183-187
151. Enquete-Kommission „Vorsorge zum Schutz der Erdatmosphäre“, 1988
152. Milankovitch, M.: *Kanon der Erdbestrahlung*. R. Serbian Acad. Spec. Publ. 132, Sect. Math. Nat. Sci. Band 33, 1941
153. Berger, A.: The Milankovitch astronomical theory of paleoclimates: a modern review. *Vistas in Astronomy* Band 24, 1980, S. 103-122
154. Jones, P.D. u. a.: Northern hemisphere surface air temperature variations 1851-1984. *Journal of Climate and Applied Meteorology* Band 25, 1986 a, S. 161-179
- Jones, P.D.; Raper, S.C.B.; Wigley, T.M.L.: Southern hemisphere surface temperature variations 1851-1984. *Journal of Climate and Applied Meteorology* Band 25, 1986 b

- Jones, P.D.: Hemispheric surface air temperature variations: recent trends and an update to 1987. *Journal of Climate* Band 1, 1988, S. 654-660
155. Hansen, J.E.; Lebedeff, S.: Global surface air temperatures: Update through 1987. *Geophys. Res. Lett.* Band 15, 1988, S. 323-326
- Hansen, J.; Lebedeff, S.: Global trends of measured surface air temperature. *J. Geophys. Res.* Band 92, 1987, S. 13345-13372
156. Vinnikov, K.Y.; Groisman, P.Y.; Lugina, K.M.: The empirical data on modern global climate changes (temperature and precipitation). *J. Climate*, 1990, im Druck
157. Jones, P.D.: Global temperature variations since 1861: The influence of the southern oscillation and a look at recent trends. In: *Proceeding of 28th Liège International Astrophysical Colloquium*. June 26 — 30, 1989, Crutzen, J.C.; Gérard, P.J.; Zander, R. (Hrsg.), Université de Liège, 1989, S. 287-302
158. Vgl. die schriftliche Stellungnahme von Kelly, P.M. anlässlich der Anhörung „Treibhauseffekt“ in: EK-Drucksache 11/129, 1990
159. nach Jones, 1989
160. Schönwiese, C.-D.; Birrong, W.; Schneider, U.; Ullrich, R.: Statistische Analysen des Zusammenhangs säkularer Klimaschwankungen mit extremen Einflußgrößen und Zirkulationsparametern unter besonderer Berücksichtigung des Treibhausproblems. Bericht Nr. 84, Institut für Meteorologie und Geophysik der Universität Frankfurt am Main, 1990
161. Angell, J.K.: Variations and trends in tropospheric and stratospheric global temperature 1958 — 1987. *J. of Climate* Band 1, 1988, S. 1296-1313
162. Vgl. die schriftliche Stellungnahme von Flohn, H. anlässlich der Anhörung „Treibhauseffekt“ in: EK-Drucksache 11/125, 1990, S. 41-97
163. Flohn, 1990
164. Schlesinger, M.E.; Mitchell, J.F.B. In „Projecting the climatic effects of increasing carbon dioxide“, MacCracken, C.; Luther, F. (Hrsg.). Department of Energy, Washington, D.C., 1985, S. 81-147
165. so u. a. von Bradley, R.S. u. a.: Precipitation fluctuations over Northern Hemisphere land areas since the mid-19th century, *Science* Band 237, 1987, S. 171-175
- und Diaz, H.F.; Bradley, R.S.; Eischeid, J.K.: Precipitation Fluctuations over global land areas since the late 18s. *J. Geophys. Res.* Band 94, 1989, S. 1195-1210
- sowie Vinnikov u. a., 1990
166. nach Bradley u. a., 1987
167. Vgl. die schriftliche Stellungnahme von Schönwiese, C.-D. anlässlich der Anhörung „Treibhauseffekt“ in: EK-Drucksache 11/123, 1990, S. 75-99
168. Bradley u. a., 1987
169. Pittock, A.B.: Recent climatic change in Australia: Implications for a CO<sub>2</sub>-warmed earth. *Climatic Change* Band 5, 1983, S. 321-340
170. Gregory, S.: The changing frequency of droughts in India, 1871 — 1985. *J. Geogr.* Band 155, 1989, S. 322-334
171. Zwally, H.J.: Growth of Greenland ice sheet: Interpretation. *Science* Band 246, 1989, S. 1589-1591
172. Broecker, W.S.; Denton, G.H.: What drives glacial cycles? *Scientific American*, January 1990, S. 43-50
173. Gornitz, V.; Lebedeff, S.: Global sea level changes during the past century. In: *Sea-level fluctuations and coastal evolution*, Nummedal, D.; Pickey, O.H.; Howard, J.D. (Hrsg.). SEPM Special Publication Nr. 41, 1987
174. Barnett, T.P.: Global sea level change. In: *NCPO, Climate variations over the past century and the greenhouse effect. A report based on the „First Climate Trends Workshop“, 7.-9. September 1988, Washington, D.C., National Climate Program Office/NOAA, Rockville, Maryland, USA*
175. Peltier, B.R.; Tushingham, A.M.: Global sea level rise and the greenhouse effect: Might they be connected? *Science* Band 244, 1989, S. 806-810
176. Gornitz und Lebedeff, 1987
177. Barnett, 1988
178. nach Gornitz und Lebedeff, 1987
- und Barnett, 1988
179. Wigley, T.M.L.; Raper, S.C.B.: Thermal expansion of sea water associated with global warming. *Nature* Band 330, 1987, S. 127-131
180. Meier, M.F.: Reduced rise in sea level. *Nature* Band 343, 1990, S. 115-116
181. Meier, M.F.: Contribution of small glaciers to global sea level. *Science* Band 226, 1984, S. 1418-1421
182. Zwally, 1989
183. Zwally, 1989
184. Weidick, A.: Review of glacier changes in West Greenland. *Z. Gletscherk. Glazialgeol.* Band 21, 1984, S. 301-309
185. Zebiak, S.E.; Cane, M.A.: A model El Niño — Southern Oscillation. *Mon. Weather Rev.* Band 115, 1987, S. 2262-2278
186. Pittock, A.B.: Climate change and pattern of variation in Australian rainfall, *Search* Band 6, 1975, S. 498-504
- Behrend, H.: Teleconnections of rainfall anomalies and of the Southern Oscillation over the entire tropics and their seasonal dependence. *Tellus* Band 39 A, 1987, S. 138-151
187. Flohn, 1989
188. Flohn, 1989
189. Nitta, T.; Yamada, S.: Recent warming of tropical sea surface temperature and its relationship to the Northern Hemisphere circulation. *J. Met. Soc. Japan* Band 67, 1987, S. 375-383
190. Flohn, 1989
191. Flohn, 1989
192. vgl. Lamb: *Klima und Kulturgeschichte. Der Einfluß des Wetters auf den Gang der Geschichte* (Deutsche Übersetzung). Rowohlt Verlag, Reinbek, 1989
193. Dickinson, 1982
194. Graßl, H.: What are the radiative and climatic consequences of the changing concentration of atmospheric aerosol particles. In: *The Changing Atmosphere*, Rowland, Isakson (Hrsg.), Wiley, London, 1988 b, S. 187-199
- nach UNEP/WMO Intergovernmental Panel on Climate Change (WMO/UNEP IPCC): Bericht der Arbeitsgruppe I „Scientific Assessment of Climate Change“. Draft report, März 1990
195. nach UNEP/WMO, 1990
196. nach UNEP/WMO, 1990
197. UNEP/WMO, 1990
198. Husar, R.B.; Patterson, D.E.; Holloway, J.M.; Wilson, W.E.; Ellestad, T.G.: Trends of eastern U.S. haziness since 1948.

- Fourth symposium on turbulence, diffusion and air pollution, January 15-18, Reno, Nevada, American Meteor. Soc., 1979, S. 249-256
199. Winkler, P.; Kaminski, U.: Increasing submicron particle mass concentration at Hamburg. *Observation Atm. Env.* Band 22, 1988, S. 2871-2878
200. Graßl, H.: Strahlung in getriebenen Atmosphären und in Wolken. *Hamburger Geophysikalische Einzelschriften, Reihe B, Heft 37*, 1978
- Twomey, S.: The influence of pollution on the shortwave albedo of clouds. *J. Atm. Sci.* Band 34, 1977, S. 1149-1152
- Twomey, S.; Piepgrass, M.; Welfe, T.L.: An assessment of the impact of pollution on global cloud albedo. *Tellus* Band 36 B, 1984, S. 356-366
- Graßl, H.: The influence of aerosol particles on radiative parameters of clouds. *Idöjaras* Band 86, 1982, S. 60-74
201. Coakley, J.A.; Bernstein, R.L.; Durkee, P.A.: Effect of ship stack effluents on cloud reflectivity. *Science* Band 237, 1987, S. 1020-1022
202. Graßl, 1988 b
203. Wigley, T.M.L.: Possible Climate Change due to SO<sub>2</sub>-derived cloud condensation nuclei. *Nature* Band 339, 1988, S. 365-367
204. Sagan, C.; Toon, O.B.; Pollack, J.B.: Anthropogenic albedo changes and the Earth's climate. *Science* Band 206, 1979, S. 1363-1368
205. Hansen, J. u. a.: Global climate changes as forecast by Goddard Institute for Space Studies (GISS's) three-dimensional model. *J. Geophys. Res.* Band 93, 1988, S. 9341-9364
- Abb. 9: Zeitlicher Trend der atmosphärischen CO<sub>2</sub>-Konzentration
- Abb. 10: Trend der globalen CH<sub>4</sub>-Emission zwischen 1940 und 1980
- Abb. 11: Zeitlicher Anstieg der O<sub>3</sub>-Konzentration in der freien Troposphäre gemessen an der Station Zugspitze in 3 000 m Höhe
- Abb. 12: Paläoklimatische Temperaturvariation der Nordhemisphäre
- Abb. 13: Anomalien der globalen bodennahen Temperaturen (1861-1988) unter Berücksichtigung der kontinentalen und Marinedaten
- Abb. 14: Lineare Trends der bodennahen Lufttemperatur (1890-1985)
- Abb. 15: Langzeittrends des Niederschlags (1855-1985) für die Breiten von 35-70°N, 5-35°N und 0-5°N
- Abb. 16: Zeitreihe des Jahresmittelwertes des globalen Meeresspiegels
- Abb. 17: Strahlungshaushalt der Erde
- Abb. 18: Schematische Darstellung des Treibhauseffektes der Atmosphäre
- Abb. 19: Stark geglättete Absorptionsspektren der Treibhausgase in der Atmosphäre, nach ihrer Bedeutung geordnet

## 5. Abbildungsverzeichnis

- Abb. 1: Vertikale Temperaturverteilung und Einteilung der Erdatmosphäre
- Abb. 2: Schematische Darstellung des Wasserkreislaufes
- Abb. 3: Breitenabhängige Daten des Wasserkreislaufes
- Abb. 4: Schematische Darstellung des geochemischen Kohlenstoffkreislaufes
- Abb. 5: Zeitlicher Verlauf der Methan-Konzentration, gemessen an der Station Cape Point, Südafrika (34°S; 18°E)
- Abb. 6: Zeitlicher Trend des atmosphärischen CH<sub>4</sub>-Gehalts
- Abb. 7: Zunahme des Wasserdampfgehalts in 3 bis 6 km Höhe an 4 Stationen im äquatorialen Pazifik
- Abb. 8: Zeitliche Variation der CH<sub>4</sub>- und CO<sub>2</sub>-Konzentration während der vergangenen 160 000 Jahre, ermittelt aus dem Vostok-Eisbohrkern

## 6. Tabellenverzeichnis

- Tab. 1: Chemische Zusammensetzung der trockenen troposphärischen Luft
- Tab. 2: Quellen und Senken des Methans in der Troposphäre
- Tab. 3: Quellen und Senken des Distickstoffoxids
- Tab. 4: Quellen und Senken des Ozons in der Troposphäre
- Tab. 5: Quellen und Senken des Kohlenmonoxids in der Troposphäre
- Tab. 6: Quellen und Senken der Stickoxide in der Troposphäre
- Tab. 7: Troposphärische Verweilzeiten verschiedener flüchtiger organischer Verbindungen
- Tab. 8: Mittlere globale Konzentration, Zeittrends und Verweilzeiten verschiedener halogener Kohlenwasserstoffe in der Troposphäre im Jahre 1990
- Tab. 9: Charakteristika der Treibhausgase
- Tab. 10: Treibhauspotentiale für verschiedene Zeitperioden
- Tab. 11: Relatives Treibhauspotential für die indirekt klimawirksamen Spurengase



## 2. KAPITEL

### Klimamodelle und Gütetest

Zur Abschätzung einer zukünftigen Klimaänderung gibt es genau wie bei der Wettervorhersage nur einen Weg: Verwendung numerischer Modelle. Die als Klimamodell verwendeten sollten nicht nur alle für die gewünschte Zeitskala wichtigen physikalischen, sondern auch die chemischen und biologischen Prozesse enthalten. Darüber hinaus gibt es zwei weitere Gründe, Klimamodelle zur Abschätzung menschlichen Einflusses auf das globale Klima zu benutzen: Erstens verhindert die starke natürliche Variabilität aller Klimaparameter den Nachweis eines anthropogenen Beitrages in den Beobachtungen sehr lange, selbst wenn die Reaktion der Störung unmittelbar folgte. Zweitens verzögern die sehr träge reagierenden Teile des Klimasystems wie Ozean und Eisgebiete eine volle Reaktion auf eine Störung um Jahrzehnte bis Jahrhunderte. Wir brauchen Klimamodelle also nicht nur zum Blick in die Zukunft sondern auch zum Nachweis dafür, was bereits an unumkehrbaren Änderungen angestoßen ist, und um zu berechnen, wann wir mit zweifelsfrei erkennbaren anthropogenen Klimasignalen zu rechnen haben. Da viele Prozesse in Ozean, Atmosphäre, Biosphäre und Kryosphäre noch nicht ausreichend verstanden sind, also auch nicht in eine verlässliche mathematische Beziehung gegossen werden können, sind auch die komplexesten aller Klimamodelle noch immer nur grobe Beschreibungen der Realität. Während sie beispielsweise die Zunahme der globalen Niederschlagsmenge bei Erwärmung recht zuverlässig beschreiben sollten, weil sie den gesamten Energiehaushalt der Erde bei bekannten physikalischen Grundgesetzen korrekt behandeln, ist die Breitenzone mit zusätzlichem Niederschlag nur annähernd korrekt und die Region mit zusätzlichem Niederschlag nur ungenau anzugeben. Trotz dieser Schwäche stellt dieses Kapitel das für die Interpretation der Modellergebnisse Notwendige über die Struktur der Modelle vor, denn die Klimamodelle liefern – zusammen mit den paläoklimatischen Befunden – die stärksten Argumente bei der Diskussion um Größe, grobe regionale Verteilung und zeitliche Abfolge einer vom Menschen verursachten Klimaänderung.

Bei allen Klimamodellrechnungen mit Aussagekraft für politische Entscheidungen lautet die Reihenfolge der einzusetzenden Rechenmodelle und der von ihnen beschriebenen Effekte:

1. Aus den Emissionsfaktoren und dem Rohstoffeinsatz ergeben sich die Emissionsraten der klimawirksamen Stoffe.
2. Zusammen mit einem Modell des Kreislaufs eines Stoffes lassen sich Angaben über die zeitabhängige Konzentration der klimawirksamen Stoffe als Folge der Emissionsraten machen.

3. Diese werden kombiniert mit einem Modell des Strahlungstransports im System Oberfläche/Atmosphäre zur Berechnung der Störung des Strahlungshaushaltes der Erde durch veränderte Zusammensetzung der Atmosphäre, und
4. globale numerische Modelle des Klimas liefern dann das veränderte globale Klima bei vorgegebener zeitlich veränderlicher Störung.

Auch bei Nutzung vereinfachter Klimamodelle ist diese Abfolge von Effekten und zugehörigen Modellen zu beachten, wobei bisher nur Schritt 3 und 4 meist kombiniert ausgeführt werden, eigentlich aber die Schritte 2 bis 4 gemeinsam, das heißt aufeinander rückwirkend, gerechnet werden müßten, um zum Beispiel die Ozongehaltsänderungen bei Temperaturänderungen berücksichtigen zu können. In 3. werden solche Kombinationen für einfache sogenannte chemische Klimamodelle vorgestellt. Bevor das geschieht, muß in 1. auf die Besonderheit des Kreislaufes des Elementes Kohlenstoff eingegangen werden, weil eines der wichtigsten Treibhausgase, nämlich das Kohlendioxid (CO<sub>2</sub>), im Hauptspeicher Ozean und an der Erdoberfläche durch Pflanzen in verschiedene Verbindungen umgewandelt wird.

#### 1. Modelle des Kohlenstoffkreislaufes

Um die Änderung des Gehaltes der Atmosphäre an Kohlendioxid verstehen und zukünftige vorhersagen zu können, sind Modelle des globalen Kohlenstoffkreislaufes notwendig. In ihnen wird versucht, die Dynamik der Kohlenstoffspeicher der Erde und die Dynamik der Flüsse zwischen den Speichern zu verstehen. Interessieren nur die nächsten Jahrhunderte, so ist die Beschränkung auf die Speicher Atmosphäre, Ozean und Biosphäre an Land erlaubt; denn der Fluß in die oder aus der Erdkruste (Sedimentation, Verwitterung) läuft viel langsamer ab. Eine weitere Vereinfachung ergibt sich aus dem Umstand, daß die Atmosphäre als ein gut durchmischter Speicher betrachtet werden kann, weil die auftretenden regionalen und jahreszeitlichen Schwankungen des Kohlendioxidgehaltes recht gering sind (einige ppmv bei einem globalen Mittelwert von zur Zeit 354 ppmv).

##### 1.1 Kohlenstoff im Ozean

Modelle des ozeanischen Kohlenstoffkreislaufes lassen sich zwei Kategorien zuordnen. Zur ersten zählen die „Boxmodelle“, in welchen der Ozean in eine relativ kleine Anzahl (2 bis 50) miteinander verknüpfter Quader („Boxen“) unterteilt wird (1). Die Flüsse der

wesentlichen Substanzen wie Wasser, Kohlenstoff oder Nährstoffe zwischen diesen Boxen werden dabei meist als linear von den Konzentrationsdifferenzen abhängig angenommen. Die zugehörigen Koeffizienten werden aus der beobachteten Verteilung von Nährstoffen, Sauerstoff, Temperatur und Salzgehalt wie auch von erst jüngst eingetragenen anthropogenen Spurenstoffen bestimmt. Innerhalb der einzelnen Boxen werden die chemischen Umwandlungen gelöster Kohlenstoffverbindungen sowie, nur in vereinfachter Weise, die Überführung des Kohlenstoffs aus der anorganischen in die organische Form, zum Beispiel in Kalkschalen des Phytoplanktons, oder deren Auflösung berechnet.

Die numerisch einfachen Boxmodelle eignen sich besonders zum Studium der Bedeutung einzelner Prozesse wie beispielsweise des Gasaustausches, der Tiefenwasserbildung, der biologischen Pumpe und anderer Prozesse. Da diese Modelle durch Vergleich mit Spurenstoffkonzentrationen geeicht wurden, und deshalb zum Beispiel das Eindringen des bei den Atomwaffentests freigesetzten radioaktiven Kohlenstoffisotops  $^{14}\text{C}$  gut wiedergeben, kann mit diesem Modelltyp die gegenwärtige Speicherung eines Teiles des anthropogenen  $\text{CO}_2$  durch den Ozean durchaus abgeschätzt werden.

Diesen Vorzügen der Boxmodelle stehen jedoch schwerwiegende Nachteile gegenüber: Wegen der mangelhaften räumlichen Auflösung können die Boxmodelle nur schlecht mit regionalen Beobachtungen verifiziert werden. Außerdem wird in Boxmodellen ein Ozean ohne Zirkulationsänderungen beschrieben, so daß die bei Strömungsänderungen geänderte Speicherkapazität für anthropogenes  $\text{CO}_2$ , aber auch die Reaktion des gesamten natürlichen Kohlenstoffkreislaufes im Ozean auf Klimaänderungen nicht erfaßt werden können.

Die zweite Modellkategorie umfaßt dreidimensionale, höher auflösende Modelle des ozeanischen Kohlenstoffkreislaufes. Diese Modelle benutzen zur Berechnung des Transportes von Wasser und Beimengungen das Strömungsfeld eines ozeanischen Zirkulationsmodells. In einem solchen Modell wird an jedem Punkt des Rechengitters die Veränderung der Kohlenstoffverbindungen einschließlich der Umwandlung von anorganischen in organische Formen des Kohlenstoffes und umgekehrt berechnet. Biologische Produktivität, Auflösung von organischen Partikeln und die Sedimentation auf dem Meeresboden sind also enthalten. Zur Zeit existieren nur zwei solcher Modelle (2). Die Aussagekraft des berechneten ozeanischen Kohlenstoffkreislaufes hängt sehr stark von der Qualität der Dynamik des Ozeanmodells ab. Der Vergleich mit den Eindringmustern anthropogener Spurenstoffe wie des Tritium ( $^3\text{H}$ ), radioaktiven Kohlenstoffs ( $^{14}\text{C}$ ) und einzelner Fluorchlorkohlenwasserstoffe führt zu zufriedenstellenden Ergebnissen und erlaubt daher einen Test der Modelle auch mit Berechnungen der Aufnahme von anthropogenem  $\text{CO}_2$ .

Die bisherigen Simulationen mit den beiden Zirkulationsmodellen weisen für die Zeit um 1980 eine etwas kleinere Aufnahme an anthropogenem  $\text{CO}_2$  im Ozean aus (1,2-1,8 Milliarden Tonnen Kohlenstoff pro Jahr) als die mit  $^{14}\text{C}$  Messungen angepaßten Boxmodelle

(1,8-2,4 Milliarden Tonnen Kohlenstoff pro Jahr). 1,8 Milliarden Tonnen Kohlenstoff pro Jahr entsprechen etwa 30 Prozent der anthropogenen Emissionen.

Alle Modelle des ozeanischen Kohlenstoffkreislaufes sind vor allem im biologischen Teil noch wenig aussagekräftig. Als eine der bisher benutzten Vereinfachungen sei genannt: Die Produktion von Biomasse wird nur vom Nährstoffangebot, der Intensität des Lichtes und der lokalen Turbulenz bestimmt. Ansätze, die marine Populationsdynamik durch eine vereinfachte Nahrungskette zu modellieren, werden zur Zeit erprobt. Diese Prozesse sind zwar für die gegenwärtige Speicherung des anthropogenen  $\text{CO}_2$  im Ozean nicht sehr bedeutend, weil angenommen wird, daß die biologische Produktion durch die Nährstoffe begrenzt ist und ein zusätzlicher Eintrag von Kohlenstoff die marine Produktivität nicht beeinflußt. Eine realistischere Beschreibung der biologischen Prozesse im Ozean ist dennoch wünschenswert: Einmal wird es in naher Zukunft sehr viele Satellitendaten geben, die die oberflächennahe Chlorophyllkonzentration liefern können. Damit wird also der gegenwärtige Zustand eines Teils des biologischen Kohlenstoffkreislaufes im Ozean zu Vergleichszwecken zur Verfügung stehen. Andererseits wird sich als Folge einer veränderten Ozeanzirkulation auch das Nährstoffangebot ändern und damit die biologische Produktivität des Ozeans.

## 1.2 Kohlenstoff in der Land-Biosphäre

Die Inhomogenität der Biosphäre an Land sowie die Vielfalt der in ihr ablaufenden Prozesse zwingen bisher dazu, diesen Bereich in globalen Modellen sehr einfach darzustellen. Auch hier überwiegt der Typ Boxmodell, in dem die biologische Vielfalt in nur wenige Teilspeicher gepreßt wird, zum Beispiel in die Kategorien lebende Biomasse (mit Unterteilung in holzartige und krautige Vegetation), Abfall und Humus (3). Das dynamische Verhalten des Modells wird durch die Flüsse zwischen den Teilspeichern bestimmt, welche jedoch nur aus wenigen Feldstudien abgeleitet wurden. Im Gegensatz zum ozeanischen Kohlenstoffkreislauf fehlen für den Kreislauf an Land globale Datensätze zum Test der Modelle. Ausnahmen bilden nur der beobachtete Verlauf des Anstiegs der atmosphärischen Konzentration des  $\text{CO}_2$  und die isotopische Zusammensetzung des  $\text{CO}_2$ . Beide können allerdings nicht ohne Berücksichtigung der Rolle des Ozeans interpretiert werden.

Große Bedeutung für die Modellierung des Kohlenstoffkreislaufes hat der sogenannte  $\text{CO}_2$ -Düngungseffekt. Dieser Effekt bewirkt, daß bei erhöhtem  $\text{CO}_2$ -Gehalt der Luft zusätzlich Kohlenstoff in Pflanzen und ihrem Abfall gespeichert wird. Da dazu zwar viele Gewächshausversuche, aber keine Untersuchungen in natürlichen Ökosystemen vorliegen, wird der  $\text{CO}_2$ -Düngungseffekt in den meisten Boxmodellen mit einem freien Parameter beschrieben. Der Wert dieses Parameters wird so angepaßt, daß bei gemeinsamen Läufen dieses Modells mit einem Ozeanmodell der tatsächlich beobachtete atmosphärische  $\text{CO}_2$ -Anstieg berechnet wird (4).

Zur Zeit existiert erst ein einziges hochauflösendes Modell der terrestrischen Biosphäre (5). In diesem wird die Einteilung der Biosphäre in nur fünf Teilspeicher zwar beibehalten, aber für viele kleine als Gitter über die Erde gespannte Gebiete getrennt vorgenommen. In jedem Teilgebiet werden die Flüsse des Kohlenstoffs zwischen den einzelnen Teilspeichern aus dem Bodentyp, der Zusammensetzung der Vegetation, der Art der Landnutzung sowie aus den Klimaparametern mittlere Temperatur und Jahresniederschlag bestimmt.

Dieser Ansatz bietet eine Möglichkeit, die Wechselwirkung zwischen Klima und terrestrischer Biosphäre zu untersuchen. Zusätzlich kann das Modell die mit geänderter Landnutzung (zum Beispiel den Waldrodungen in den Tropen) einhergehenden umverteilten und freigesetzten Kohlenstoffmengen berechnen. Die so bestimmten Flüsse des Kohlenstoffs sind jedoch noch nicht an weltweiten Beobachtungen getestet worden.

Zuverlässige Szenarien der möglichen Entwicklung können die gegenwärtigen Modelle der terrestrischen Biosphäre also noch nicht geben. Insbesondere fehlt eine realistischere Dynamik der Vegetation als Reaktion auf externe Störungen wie Temperatur- und Niederschlagsänderungen.

### 1.3 Simulation des Kohlenstoffkreislaufes mit gekoppelten Modellen

Zur Berechnung des beobachteten wie des zukünftigen Konzentrationsanstiegs des CO<sub>2</sub> in der Atmosphäre müssen die Modelle für den Ozean und die terrestrische Biosphäre mit dem atmosphärischen Kohlenstoffreservoir verbunden werden. Zur Verifizierung des so gekoppelten Modells stehen folgende Daten zur Verfügung (6):

- Anstieg des CO<sub>2</sub>-Gehaltes in der Atmosphäre mindestens seit 1860;
- Abnahme des Isotopenverhältnisses <sup>13</sup>C/<sup>12</sup>C in der Luft seit 1860, verursacht durch Emission des an <sup>13</sup>C ärmeren also leichteren Kohlenstoffs erstens aus fossilen Quellen und zweitens bei der Zerstörung von heute lebenden Pflanzen;
- Abnahme des radioaktiven Anteils (<sup>14</sup>C) des Kohlenstoffs in der Atmosphäre und in den oberen Ozeanschichten von 1860 bis 1950 wegen der Nutzung des <sup>14</sup>C-freien fossilen Kohlenstoffes.

Bei diesen Simulationen ist auch die Kenntnis der in der Vergangenheit emittierten CO<sub>2</sub>-Menge notwendig. Während die fossile Quelle relativ gut bekannt ist (7), sind die Emissionen durch Änderungen in der Landnutzung relativ unsicher (8).

Vertraut man dem Modellteil Ozean, so können die Nettoflüsse aus der Biosphäre durch Anpassung (9) an den beobachteten Gehalt in der Atmosphäre bestimmt werden.

Vorhersagen der atmosphärischen CO<sub>2</sub>-Konzentration für das nächste Jahrhundert hängen in starkem Maße von den zu Grunde gelegten Emissionsszenarien ab (10). Da alle gegenwärtigen Modelle mit <sup>14</sup>C-

Werten nach den Atomwaffentests verifiziert sind und durch Anpassung der Modellparameter den nahezu exponentiellen Anstieg der CO<sub>2</sub>-Konzentration während der vergangenen 25 Jahre gut wiedergeben, folgen bei weiter zunehmenden Emissionsraten sehr ähnliche Prognosen für die nächsten 50 Jahre. Nur bei abrupt geänderten Emissionsraten spielt die unterschiedliche Dynamik der einzelnen Modelle eine Rolle.

Alle zur Zeit vorliegenden Szenarienrechnungen für den CO<sub>2</sub>-Gehalt in naher Zukunft vernachlässigen Rückkopplungseffekte eines geänderten Klimas auf den Kohlenstoffkreislauf, zum Beispiel durch Änderungen der Ozeanzirkulation, Änderungen des Niederschlags und der Temperatur. Diese Effekte könnten befriedigend nur in gekoppelten dreidimensionalen Modellen des Kohlenstoffkreislaufes und des Klimas erfaßt werden, von denen es noch kein einziges gibt.

## 2. Vereinfachte Klimamodelle

Unter die Kategorie der vereinfachten Klimamodelle fallen sowohl die meist eindimensionalen Energiebilanzmodelle als auch die ein- und teilweise zweidimensionalen Strahlungs-Konvektionsmodelle. Energiebilanzmodelle berücksichtigen nur, daß der Energiehaushalt des Planeten Erde ausgeglichen ist, vernachlässigen aber Transportprozesse oder schreiben sie vor. Strahlungs-Konvektionsmodelle behandeln den vertikalen Transport von Wärme und Wasserdampf in vereinfachten Ansätzen, sie steuern die Umwälzung der Troposphäre mit dem vertikalen Temperaturgradienten. Während die eindimensionalen Energiebilanzmodelle entweder nur die vertikale Struktur der Atmosphäre oder die meridionale Änderung einer vertikal gemittelten Atmosphäre beschreiben und die Wechselwirkungen mit dem Wasserkreislauf der Atmosphäre meist ignorieren, wird der Wasserkreislauf in Strahlungs-Konvektionsmodellen besonders berücksichtigt.

Obwohl die atmosphärischen Prozesse mit den dreidimensionalen allgemeinen Zirkulationsmodellen wesentlich besser modelliert werden können, haben vereinfachte Klimamodelle auch heute noch große Bedeutung. Da mit ihnen eine Vielfalt von Empfindlichkeitsstudien und Szenarienrechnungen rasch und wenig rechenaufwendig durchgeführt werden können (vgl. 4. Kapitel), haben sie eine wichtige Aufgabe zu erfüllen. Zur Abschätzung der Verlässlichkeit müssen die Ergebnisse aus vereinfachten Klimamodellen und allgemeinen Zirkulationsmodellen sowohl mit Messungen als auch untereinander verglichen werden.

### 2.1 Energiebilanzmodelle

Im einfachsten Energiebilanzmodell wird für eine Standardatmosphäre die Änderung der nach unten gerichteten Strahlungsflußdichte in der Höhe der Tropopause in der Atmosphäre errechnet. Da die Änderung der Temperatur in Bodennähe recht eindeutig von der Änderung der Strahlungsflußdichte an der Tropopause abhängt, errechnet ein solches sehr ver-

einfachtes Modell als Folge einer Verdoppelung der  $\text{CO}_2$  Konzentration in der Atmosphäre gegenüber dem vorindustriellen Wert eine Temperaturzunahme von  $1,1^\circ\text{C}$  an der Erdoberfläche (11). Dabei ist allerdings keinerlei Rückkopplung mit dem Wasserkreislauf beachtet worden, das heißt weder Wasserdampf noch Wolken dürfen sich ändern, und auch die Helligkeit der Erdoberfläche blieb konstant.

Neben diesem einfachen Energiebilanzmodell existieren eine Reihe von detaillierteren eindimensionalen Energiebilanzmodellen (12), wobei einige auch die Breitenabhängigkeit der Temperatur bestimmen, dazu allerdings die meridionalen Wärmetransporte vorschreiben müssen (13). Auch zweidimensionale Energiebilanzmodelle, die sowohl breiten- als auch höhenabhängig sind, haben eine Rolle bei der Abschätzung der Bedeutung zahlreicher Wechselwirkungen im Klimasystem gespielt (14). Energiebilanzmodelle werden unter anderem in Szenarienrechnungen verwendet.

## 2.2 Strahlungs-Konvektionsmodelle

In diesen Modellen wird iterativ das veränderte vertikale Temperaturprofil berechnet, das bei Störungen des Strahlungshaushaltes das Energiegleichgewicht des Planeten Erde wieder herstellt, wobei die konvektiven Umwälzungen in der Troposphäre berücksichtigt werden. Die Strahlungs-Konvektionsmodelle zeichnen sich also dadurch aus, daß sie die Wechselwirkungen zwischen Sonnen- und Wärmestrahlung einerseits und dem Wasserkreislauf der Atmosphäre andererseits berücksichtigen können. Sie errechnen die Vertikalverteilung der Temperatur im Gleichgewicht mit vorgeschriebener vertikaler Verteilung von Treibhausgasen sowie der Rückstreuungsfähigkeit der Erdoberfläche für Sonnenstrahlung und der Emissionsfähigkeit für Wärmestrahlung. Folgende Vorgänge sind in solchen Modellen enthalten:

- Absorption und Streuung von Sonnenstrahlung sowie Emission und Absorption von Wärmestrahlung durch die Erdoberfläche und die Atmosphäre;
- trockene und feuchte Konvektion als steuernder Vorgang für die vertikale Verteilung der Temperatur in der Troposphäre;
- veränderter Wasserdampfgehalt der Atmosphäre bei Temperaturveränderung;
- mittlerer Wolkenbedeckungsgrad als Funktion der Oberflächenparameter und des Temperaturprofils.

Der Transport von Wärme und Wasserdampf in der Atmosphäre wird dadurch simuliert, daß die Temperaturabnahme mit der Höhe fest vorgegebene Grenzwerte nicht überschreiten darf, die sich am feucht-adiabatischen Temperaturgradienten orientieren, der bei Konvektion in Wolken in der Atmosphäre stets eingehalten wird. Der Wasserdampfgehalt wird durch die plausible Annahme konstanter relativer Feuchte bei Änderung der Temperatur geändert, er steigt folglich mit steigender Temperatur, wodurch die Rückkopplung zwischen Wasserdampfgehalt der Atmosphäre und Temperatur korrekt simuliert wird. Auch

der Bedeckungsgrad mit Wolken und die Temperatur oder Höhe der Wolkenobergrenze können in diesen Modellen aus Oberflächenparametern berechnet werden (15).

Vereinfacht man ein solches Strahlungs-Konvektionsmodell so, daß in ihm das vertikale Temperaturprofil, der Wasserdampfgehalt und die Rückstreuungsfähigkeit (Albedo) der Oberfläche konstant bleiben, so schwankt die errechnete Temperaturänderung in Bodennähe als Folge der Verdoppelung der  $\text{CO}_2$ -Konzentration etwa zwischen  $1,2^\circ\text{C}$  (16) und  $1,3^\circ\text{C}$  (17). Sie ist – weil eigentlich mit einem einfachen Energiebilanzmodell berechnet – fast identisch mit der Temperaturzunahme im Energiebilanzmodell.

Wird in einem Strahlungs-Konvektionsmodell dagegen die relative Feuchte konstant gehalten (wie oben schon als Normalfall beschrieben), so wird damit die Rückkopplung zwischen Wasserdampf und Temperatur simuliert, da der Wasserdampf entsprechend der Clausius-Clapeyron Gleichung exponentiell mit der Temperatur ansteigt. Durch diese Rückkopplung vergrößert sich die Erwärmung in Bodennähe um 50 bis 80 Prozent gegenüber den Modellen ohne Rückkopplung (18), wobei sogar etwa zehn Prozent des zusätzlichen Temperaturanstiegs durch die Absorption von Sonnenstrahlung durch Wasserdampf in der planetarischen Grenzschicht (etwa dem untersten Höhenkilometer) hervorgerufen wird. Auch die Rückkopplung zwischen Eisbedeckung und Albedo der Oberfläche kann mit diesen Modellen errechnet werden. Durch sie steigt die mittlere globale Temperaturänderung in Bodennähe um weitere etwa 15 Prozent (19).

Weitere Elemente wichtiger Wechselwirkungen in diesen Modellen sind die Variation der Temperatur der Wolkenobergrenze und des Bedeckungsgrades – beides Teile des globalen Wasserkreislaufes. Die Temperatur an der Wolkenoberfläche ist ein sehr wichtiger Klimaparameter, weil kalte Wolkenoberflächen wesentlich weniger infrarote Wärmestrahlung emittieren, die Erde also vor Wärmeverlust schützen und somit zur Erwärmung an der Erdoberfläche beitragen, während niedrige warme Wolkenoberflächen aufgrund ihrer vergleichsweise hohen infraroten Abstrahlung in den Weltraum bei gleichzeitig erhöhter Rückstreuung von Sonnenstrahlung für die Oberfläche der Erde kühlend wirken (vgl. 1. Kap., Nr. 3.3.3).

In letzter Zeit wurden Strahlungs-Konvektionsmodelle verstärkt auch zur Abschätzung der globalen Erwärmung für den zeitabhängigen zusätzlichen Treibhauseffekt verwendet. Im Folgenden sollen die Modelle von Hoffert u. a. (20) sowie von Harvey (21) beschrieben werden. Ersteres wird vom IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change) verwendet, letzteres in modifizierter Form und gekoppelt mit dem Oeschgerschen Ozean-Boxmodell für Szenarien der Enquete-Kommission. Diese Modelle berechnen das Temperaturprofil in der Atmosphäre und im Ozean. Die eindimensionalen Modelle teilen dazu den Ozean und die Atmosphäre vertikal in verschiedene Schichten ein und den Ozean auch horizontal in zwei Bereiche, nämlich die polaren Gegenden, in denen Ozeanwasser bis zum Boden absinken kann, und den restlichen Ozean, in dem das Ozeanwasser im Mittel von

unten aufquillt. In beiden Modellen kann Wärme der Ozeanoberfläche nicht nur in Form von infraroter Wärmestrahlung in den Weltraum entweichen, sondern für die Umwälzzeit des Ozeans auch durch Vermischung des Wassers in die tieferen Schichten transportiert werden. In diesen stark vereinfachten gekoppelten Atmosphäre-Ozeanmodellen müssen fünf Größen vorgegeben werden, nämlich

- die Sensitivität des Klimas für eine Verdoppelung der  $\text{CO}_2$ -Konzentration in der Atmosphäre bei Gleichgewichtsmodellen;
- die mittlere vertikale Geschwindigkeit (Aufquellen) des Ozeanwassers außerhalb der Polargebiete;
- das Vertikalprofil des Diffusionskoeffizienten für Wärme im Ozean;
- die Tiefe der durchmischten Deckschicht des Ozeans und – die Änderung der Meeresoberflächentemperatur in den polaren Gebieten relativ zur Temperatur außerhalb dieser Regionen (22).

### 3. Gekoppelte Chemie-Klima-Modelle

Die Treibhausgase Ozon ( $\text{O}_3$ ), Methan ( $\text{CH}_4$ ) und Distickstoffoxid ( $\text{N}_2\text{O}$ ) sind mit anderen Gasen durch chemische Umwandlungen verknüpft, so daß einfache Rechnungen bei vorgegebener Konzentration die möglichen Klimaänderungen nicht genau genug beschreiben können. In sogenannten chemischen Klimamodellen wird versucht, diese Zusammenhänge zu beschreiben.

Wegen der Komplexität der chemischen und physikalischen Wechselwirkungen im Klimasystem wurden bis jetzt aber nur sehr großräumig gemittelte Klimamodelle mit Einschluß chemischer Umwandlungen entwickelt. Die meisten dieser Modelle sind eindimensional, das heißt, sie erfassen die Höhenverteilung der Änderungen von Spurengasen und Temperatur für global oder hemisphärisch gemittelte Verhältnisse ohne Berücksichtigung der Jahreszeiten. Sie haben aber den Vorteil, daß Simulationen der Effekte von Spurengasemissionen über Jahrhunderte mit vertretbarem Rechenaufwand durchgeführt werden können. Beispiele in Europa sind das Mainzer Modell (23), das Brüsseler Modell (24) sowie einige amerikanische Modelle (25).

Es gibt auch schon zweidimensionale Modelle, die zusätzlich die geographische Breite und die Jahreszeiten erfassen. Diese enthalten durchweg noch viele chemische Reaktionen, die Temperaturen in Stratosphäre und Troposphäre werden jedoch meistens, zumindest für einen Atmosphärenteil, nicht vom Modell selbst berechnet. Modelle dieser Art beschreiben vor allem die Effekte der Emissionen von Spurengasen kürzerer atmosphärischer Verweilzeit, wie  $\text{NO}_x$  und  $\text{CO}$ , besser als die eindimensionalen Modelle, da der lokale Abbau wenigstens grob erfaßt wird. Ein Beispiel für diese Modellgattung in Europa ist das Modell der Universität Oslo (26, vgl. Abschnitt D, 3. Kapitel).

Typisch für alle chemischen Modelle ist, daß die Konzentrationen von etwa 40 bis 50 Luftbestandteilen unterschiedlichster Lebensdauer aus weit über 100 chemischen Reaktionsgleichungen berechnet werden. Dabei werden die natürlichen und anthropogenen Emissionen sowie Senken am Boden und in der Atmosphäre und – in stark parameterisierter Form – Transportprozesse beachtet. Die Geschwindigkeitskonstanten der chemischen Reaktionen sind nur mit recht großen Fehlerschranken bekannt, die im Einzelfall 50 Prozent übersteigen können. Zu einer Abschätzung der Fortpflanzung dieser Fehler auf die berechnete Ozonzerstörung für den ungünstigsten Fall vgl. (27). Bei der Berechnung von Photolyseraten ist das Strahlungstransportmodell für Sonnenstrahlung sehr wichtig, weil es über spektrale Auflösung, Behandlung von Streuprozessen und Bodenreflexion, Temperaturabhängigkeit der Absorptionsquerschnitte und Quantenausbeute bei photochemischen Reaktionen (28) die in tiefere Schichten vordringende kurzwellige Strahlung bestimmt.

Mit Ausnahme des Osloer Modells in der neuesten Version enthält kein Modell die Reaktionen an Wolkenteilchen und Aerosolteilchen in der unteren Stratosphäre, die unter anderem bei der Ausbildung des Ozonlochs eine wichtige Rolle spielen. Aus diesem Grunde wird der Ozonabbau durch Chlorverbindungen in der unteren Stratosphäre deutlich unterschätzt. Dies wiederum wirkt sich auch auf die berechneten Gesamt ozonänderungen und die bodennahe Temperatur aus.

Ein weiterer wesentlicher Grund für Modellunsicherheiten liegt in der Behandlung des großräumigen Transports. Beim eindimensionalen Modell zum Beispiel ist die gesamte Meteorologie im sogenannten vertikalen Diffusionskoeffizienten enthalten. Dessen Profil, besonders im Bereich der Tropopause, beeinflußt die Lebensdauer und die Konzentration langlebiger Spurenstoffe wie zum Beispiel der FCKW. Im allgemeinen werden die Koeffizienten so angepaßt, daß die vertikale Verteilung und die historische Entwicklung der Konzentration von Spurengasen nachvollzogen werden.

Für die eindimensionalen Modelle wird angenommen, daß die Stratosphäre im Strahlungsgleichgewicht ist, die Temperatur also nicht von Transportvorgängen abhängt. Im infraroten Spektralbereich werden Wasserdampf, Kohlendioxid, Ozon, Methan, Lachgas und die Fluorchlorkohlenwasserstoffe FCKW 11, FCKW 12, FCKW 113 sowie H-FCKW 22 mittels sogenannter Breitbandmodelle berücksichtigt (29). Die Temperaturen in der Troposphäre dagegen sind über vorgegebene vertikale Temperaturgradienten oder auch konvektive Umwälzung an die Temperatur der Erdoberfläche gebunden, die aus der Energiebilanz folgt. In einigen Modellen sind in dieser Energiebilanzgleichung auch Wärmeflüsse in den Ozean enthalten, die im Wasser einen Temperaturgradienten aufbauen.

Zeitabhängige Rechnungen mit den eindimensionalen Modellen beginnen in vorindustrieller Zeit. Dabei simulieren einige Modelle den Ozeaneinfluß nur mit einer Zeitverschiebung der Erwärmung an der Erdoberfläche. In der Troposphäre wird das ursprüngliche

che Profil der relativen Feuchte aufrechterhalten, das heißt, der Wasserdampf nimmt bei Erwärmung zu. Bedeckungsgrad, Wolkenhöhe und optische Parameter der Wolken werden konstant gehalten, so daß mögliche Rückkopplungseffekte durch diesen Teil des Wasserkreislaufes nicht erfaßt werden. Ebenso wird das Reflexionsvermögen der Erdoberfläche konstant gehalten; auch die Eis-Albedo-Rückkopplung kann also nicht wirken.

Besonders wichtig, aber nicht ausreichend untersucht, ist bei den chemischen Modellen die Wechselwirkung zwischen Methan, Kohlenmonoxid und Stickoxiden sowie deren Veränderung bei erhöhter ultravioletter Einstrahlung als Folge des Ozonabbaus in der Stratosphäre. So bewirkt eine Zunahme des CO, zum Beispiel durch verstärkte Biomassenverbrennung, indirekt über eine Verminderung der Konzentration der OH-Radikale eine Zunahme des Treibhausgases Methan, dessen Hauptsenke genauso wie für das CO die Reaktion mit OH ist. In Gegenwart von NO<sub>x</sub> erhöht sich außerdem die Konzentration des troposphärischen O<sub>3</sub>, das auch ein wichtiges Treibhausgas ist. Ozonabbau durch FCKW verlangsamt dagegen bei gleichen Methanemissionen den Methananstieg. Mit eindimensionalen, globalen Modellen läßt sich diese Wechselwirkung nicht zufriedenstellend erfassen. Eine deutliche Verbesserung erreicht man, wenn man für Nord- und Südhemisphäre getrennt rechnet und den Austausch langlebiger Spurengase zwischen den Hemisphären beachtet oder zweidimensional rechnet (vgl. Abschnitt D, 3. Kapitel, Nr. 3.1).

## 4. Komplexe Klimamodelle

### 4.1 Modelle der allgemeinen Zirkulation der Atmosphäre

Im globalen Klimasystem laufen viele physikalische, chemische und biologische Prozesse mit sehr unterschiedlichen Zeitkonstanten ab (Mikrosekunden bis Jahrmillionen). Dreidimensionale Zirkulationsmodelle der Atmosphäre beschränken sich gegenwärtig jedoch noch auf den physikalischen Aspekt im Zeitbereich von etwa einer Stunde bis zu einigen Jahrzehnten. In diesem Zeitraum werden Wetterabläufe simuliert, aus denen mit statistischen Methoden ein „Modellklima“ mit Mittelwerten, Varianzen und der Häufigkeit extremer Ereignisse abgeleitet wird. Zirkulationsmodelle sind eng verwandt mit Wettervorhersagemodellen. Sie sagen jedoch nicht das Wetter zu einem bestimmten Zeitpunkt an einem bestimmten Ort vorher, sondern nur dessen statistische Verteilung.

Zirkulationsmodelle beruhen auf wohlbekanntem physikalischen Gesetzen. So wird zum Beispiel mit Hilfe der Newtonschen Bewegungsgesetze die Windverteilung berechnet. Die Strahlungsgesetze bilden die Grundlage für die Berechnung der Wärmequellen und -senken innerhalb der Atmosphäre und an der Erdoberfläche aufgrund der Absorption und Emission von Sonnen- und Wärmestrahlung. Berücksichtigt werden auch Phasenumwandlungen des Wassers wie Kondensation, Verdunstung, Schmelzen und Sublimation, wenn sich Wolken und/oder Niederschlag bil-

den, sich an der Erdoberfläche die Schneebilanz ändert oder auch die Wasserbilanz im Erdboden.

Alle diese Prozesse sind oft eng miteinander gekoppelt. Formal kommt dies auch in den Modellgleichungen zum Ausdruck, die aus einem System nichtlinearer gekoppelter Differentialgleichungen bestehen. Sie werden mit Hilfe approximativer mathematischer Verfahren gelöst. Der Rechenaufwand ist jedoch so groß, daß die Lösung der Gleichungen selbst auf den heutigen Großrechnern nur in einem groben zeitlich-räumlichen Raster möglich ist. Dabei wird die Atmosphäre bis zu einer Höhe von etwa 30 km global mit einem Netz von etwa 50 000 Gitterpunkten überspannt, die einen Abstand von etwa 500 km in der Horizontalen und ein bis drei km in der Vertikalen haben. An diesen Punkten werden die Gleichungen für zeitliche Intervalle von etwa 30 Minuten gelöst, also 100 000mal für jede Stunde „Vorhersagezeit“ oder fast 1 Milliarde mal für ein Jahr. Die hierfür erforderliche Rechenzeit auf einem heutigen Großrechner beträgt etwa 6 Stunden.

Beim Annähern der Lösungen der Differentialgleichungen durch diskrete Schritte im Computer entstehen zwei prinzipielle Fehlerquellen, nämlich ein teilweiser Verlust der physikalischen Information sowie mathematische Approximationsfehler.

- Informationsverlust: Bei einem Gitterabstand von 500 km können eine Reihe wichtiger atmosphärischer Prozesse nicht mehr „aufgelöst“ werden, wie zum Beispiel turbulente oder konvektive Vermischungsprozesse oder Wolken- und Niederschlagsbildung. Ihre Wirkung muß daher mit Hilfe empirischer Beziehungen in den Modellgleichungen berücksichtigt werden, in der Fachsprache Parameterisierung subskaliger Prozesse genannt. Der Informationsverlust ist besonders auch an der Erdoberfläche spürbar: Küstenlinien und Gebirgszüge sowie andere Strukturelemente wie Erdboden- und Vegetationstyp, Schnee oder Eis können nur im jeweiligen Modellraster wiedergegeben werden.
- Approximationsfehler: Die Genauigkeit der mathematischen Lösungsverfahren ist umso größer, je enger das Modellgitter ist. Damit nimmt aber der Rechenaufwand zu. Eine Halbierung nur der horizontalen Maschenweite erhöht den Rechenaufwand um den Faktor 8, weil aus Gründen der mathematischen Stabilität auch der Zeitschritt halbiert werden muß.

Somit hängt die Qualität eines atmosphärischen Zirkulationsmodells nicht allein vom jeweiligen Wissensstand ab, sondern vor allem auch von der Leistungsfähigkeit der zur Verfügung stehenden Rechenanlage.

### 4.2 Modelle der Zirkulation des Ozeans

Ozeanische Zirkulationsmodelle stützen sich auf die gleichen physikalischen Gesetze wie die atmosphärischen. Unterschiede bestehen jedoch in der Formulierung der Antriebsgrößen. Während die atmosphärische Zirkulation durch Unterschiede in der Strah-

lungsbilanz zwischen polaren und äquatorialen Breiten aufrechterhalten wird, werden die oberflächennahen Meeresströmungen durch die Windsysteme und die Tiefenzirkulationen durch die Verteilung von Temperatur und Salzgehalt angetrieben.

Bei der Lösung der Modellgleichungen mit Näherungsverfahren treten ähnliche Probleme auf wie in Atmosphärenmodellen; auch hier kann aus rechenökonomischen Gründen das Modellgitter nicht so fein gewählt werden, daß es alle tatsächlich beteiligten Prozesse auflöst. Modelle der ozeanischen Zirkulation verwenden eine ähnliche Auflösung wie die für die Atmosphäre: etwa 500 km in der Horizontalen und etwa 1 km in der Vertikalen. Während die Atmosphärenmodelle bei dieser Auflösung die energiereichsten Wirbel (die Tiefdruckgebiete der mittleren Breiten) explizit simulieren können, ist dies in Ozeanmodellen nicht möglich, weil die ozeanischen Wirbel sehr viel kleinräumiger sind. Ihre Wirkung auf die ozeanische Zirkulation wird in der Regel durch Diffusionsansätze parameterisiert.

Für das Klimasystem ist auch die jahreszeitliche Änderung der Meereisgebiete von Bedeutung. In ozeanischen Zirkulationsmodellen wird die Eisbildung häufig allein als thermodynamischer Prozeß beschrieben, wobei Eisbildung oder Abschmelzen aus der Energiebilanz an der Meeresoberfläche berechnet wird. Einige neuere Modelle berücksichtigen zusätzlich die Eisdynamik, also Drift und Deformation der Eisschollen durch Wind und Meeresströmung (30).

### 4.3 Gekoppelte Ozean-Atmosphäre-Modelle

Prozesse innerhalb der Atmosphäre oder des Ozeans können isoliert vom jeweils anderen Medium untersucht werden, wobei die Randbedingungen an der Meeresoberfläche in der Regel durch Beobachtungsdaten vorgeschrieben werden. Für die Untersuchung von Klimaänderungen oder auch von natürlichen Fluktuationen des Klimas werden gekoppelte Modelle benötigt, die an der Meeresoberfläche Energie (Strahlung, Wärme), Wasser (Niederschlag, Verdunstung) und Impuls (reibungsbewingter Windschub) austauschen.

Bei der Kopplung der Modelle des Ozeans und der Atmosphäre tritt jedoch ein zentrales Problem auf, das durch die sehr unterschiedlichen Umwälzzeiten von Atmosphäre und Ozean zustande kommt. Die unvermeidlichen systematischen Fehler der Einzelmodelle führen im gekoppelten Modell zur sogenannten Klimadrift.

- Zeitkonstanten: Ozean und Atmosphäre reagieren unterschiedlich schnell auf vorgegebene Störungen. Während die atmosphärische Reaktionszeit in der Troposphäre weit weniger als ein Jahr beträgt, braucht zum Beispiel ein Temperatursignal an der Meeresoberfläche etwa tausend Jahre, um entfernte Teile der Tiefsee zu erreichen. Ein atmosphärisches Zirkulationsmodell kann derzeit aber aus Rechenzeitgründen allenfalls einen Zeitraum von hundert Jahren simulieren. Wird ein solches Modell mit einem Ozeanmodell zeitlich gekoppelt, dann kann die Rechnung nicht bis zu dem Zeit-

punkt ausgeführt werden, an dem das Gesamtsystem auf eine Veränderung voll reagiert hat. Asynchrone Kopplungstechniken, bei denen der atmosphärische Teil weniger häufig gerechnet wird, befinden sich noch in der experimentellen Phase.

- Klimadrift: Systematische Fehler der Einzelmodelle äußern sich zum Beispiel in Störungen der Energiebilanz an der Meeresoberfläche. Im ungekoppelten Modell sind diese Fehler fast bedeutungslos, weil die Bilanz durch Vorgabe der Randbedingungen (zum Beispiel die beobachtete Meerestemperatur beim Atmosphärenmodell) ausgeglichen wird, was physikalisch der Ankopplung an einen unendlich großen Energiespeicher entspricht. Das gekoppelte System hat jedoch nur eine endliche Wärmekapazität. Ein anfängliches Energiedefizit des atmosphärischen Modells von nur 1 Watt pro m<sup>2</sup> im globalen Jahresmittel führt zu einer globalen Abkühlung des gekoppelten Systems von etwa 1 Grad und erst auf diesem kälteren Niveau zu einer ausgeglichenen Energiebilanz. Regional können die Fehler in den Energieflüssen und damit in der Temperatur sehr viel größer sein und Werte von 5 Grad und mehr erreichen (31). Damit liegen diese Modelle so weit vom heutigen Klimazustand entfernt, daß ihre Verwendung für die Simulation von Klimaänderungen sehr fragwürdig erscheint.

Die Klimadrift kann jedoch durch eine einfache Korrekturmethode weitgehend eliminiert werden, die häufig als „Flußkorrektur“ bezeichnet wird (32) und erstmals bei der Kopplung eines atmosphärischen Modells mit einem ozeanischen Deckschichtmodell verwendet wurde (33). Die Idee besteht darin, die systematischen Fehler der Einzelmodelle dadurch zu eliminieren, daß entsprechend große Korrekturgrößen in den Modellgleichungen des gekoppelten Systems eingeführt werden, die zwar räumlich variabel aber zeitlich konstant sind. Somit wird nur der zeitlich gemittelte Klimazustand korrigiert, während die Klimavariabilität des Modells voll erhalten bleibt. Die Korrekturterme sind als unveränderlicher Teil des gekoppelten Modells anzusehen und bleiben auch bei der Simulation von Klimaänderungen erhalten. Diese Korrekturen sind dann allerdings nur bei relativ geringen Klimaänderungen noch dem System angepaßt.

### 4.4 Gütetest globaler Zirkulationsmodelle

Ähnlich wie Wettervorhersagemodelle werden atmosphärische Zirkulationsmodelle durch Vergleich mit Beobachtungen überprüft. Basis des Vergleichs sind jedoch nicht einzelne Wetterabläufe, sondern die zeitlich-räumliche Statistik aller relevanten Klimavariablen wie Druck, Temperatur, Windgeschwindigkeit, Wolkenbedeckung, Niederschlag, Schneebedeckung und Bodenwassergehalt sowie die Strahlungs- und Energiebilanz des Systems Erde-Atmosphäre. Ein Problem bei der Prüfung der Qualität des Modells liegt darin, daß der Klimazustand der Erde nicht genau genug bekannt ist, um eine eindeutige Fehlerabschätzung der Modelle zu ermöglichen. Gerade bei wichtigen Klimagrößen wie Wolken, Niederschlag oder bei der Strahlungs- und Energiebilanz der Erd-

oberfläche vor allem über den Ozeanen, gibt es noch erhebliche Datenlücken.

Trotz dieser Beschränkungen ist erkennbar, daß die Modelle die groben Strukturen der atmosphärischen Zirkulation realistisch wiedergeben, wie zum Beispiel die globalen Windsysteme oder die Klimazonen in ihrer jahreszeitlichen Variabilität. Lokal und regional können jedoch größere Abweichungen auftreten. Temperaturfehler von einigen Grad sind gerade in mittleren und hohen Breiten keine Seltenheit. Wegen des groben Modellrasters können insbesondere Wolken und Niederschlag nur ungenau simuliert werden, vor allem in gebirgsreichen Gegenden.

Zirkulationsmodelle werden insbesondere für die Abschätzung von zukünftigen Klimaänderungen entwickelt. Die Glaubwürdigkeit der Modellprojektionen hängt von der Fähigkeit der Modelle ab, auf geänderte Randbedingungen (zum Beispiel Sonnenstrahlung oder CO<sub>2</sub>-Konzentration) korrekt zu reagieren. Ein häufig durchgeführter Modelltest besteht in der Simulation von relativ gut dokumentierten Klimadaten der Vergangenheit, wie zum Beispiel der letzten Eiszeit vor etwa 18 000 Jahren oder des „Klimaoptimums“ während des Holozäns vor 6 000 bis 9 000 Jahren. Wenn die entsprechenden Randbedingungen (Gletscherverteilung, Ozeantemperatur usw.) vorgegeben sind, wird die geographische Verteilung der Klimaänderungen zufriedenstellend reproduziert (34).

Sehr viel schwieriger ist der Gütetest für Ozeanmodelle. Während der dreidimensionale Zustand der Atmosphäre seit einigen Jahrzehnten durch operationelle Wetterbeobachtungsnetze und seit etwa zehn Jahren von Satelliten aus gemessen wird, ist die Datenbasis für die Ozeane noch sehr lückenhaft. Eine wesentliche Verbesserung der Situation ist durch ozeanographische Meßprogramme wie das World Ocean Circulation Experiment (WOCE) zu erwarten, das sowohl satellitengestützte Meßdaten für die Oberfläche bereitstellen wird als auch detaillierte Messungen im Innern der Ozeane.

#### 4.5 Gleichgewichtsrechnungen

Eine Vielzahl von Modellstudien wurde durchgeführt, um die Reaktion des Klimasystems auf eine abrupte CO<sub>2</sub>-Änderung in der Atmosphäre zu berechnen (35). In den meisten Fällen wird eine Verdoppelung der Konzentration von zum Beispiel 300 auf 600 ppmv vorgenommen. Die dadurch verursachte Verminderung der Abstrahlung infolge des erhöhten Treibhauseffektes hat eine allmähliche Erwärmung des Klimasystems zur Folge, bis die Wärmeabstrahlung sich so weit erhöht hat, daß die Strahlungsbilanz wieder ausgeglichen ist. Man nennt solche Modellexperimente Gleichgewichtsrechnungen, obwohl man eigentlich von einem Gleichgewicht nicht sprechen kann, wenn man langfristig veränderliche Prozesse berücksichtigt.

Die Einschwingzeit zum neuen Klimazustand hängt von der thermischen Trägheit des Systems ab. Während der tiefe Ozean bis zu einigen tausend Jahren benötigt, nähern sich die Atmosphäre und die oberen

Ozeanschichten dem „Gleichgewichtszustand“ sehr viel schneller. Daher wird aus rechenökonomischen Gründen nur der schnelle Teile des Klimasystems betrachtet, also die Atmosphäre mit einer wenige Meter dicken Erdbodenschicht und die ozeanische Deckschicht bis zu einer Tiefe von maximal hundert Meter einschließlich der Meereisgebiete. Ein derart reduziertes Klimasystem benötigt noch immer eine Einschwingzeit von etwa 30 bis 40 Jahren (36).

Diese Art der Modellierung hat zum Ziel, die Empfindlichkeit des Klimasystems gegenüber vorgegebenen Störungen, etwa der Energiebilanz, zu untersuchen. Eine echte Klimavorhersage ist mit diesen Modellen nicht möglich.

Ein handliches Maß für die Empfindlichkeit des Klimasystems ist die Änderung der global und jährlich gemittelten bodennahen Lufttemperatur. Bei einer Verdoppelung der CO<sub>2</sub>-Konzentration ergeben die bisher veröffentlichten Gleichgewichtsmodellrechnungen eine globale Erwärmung zwischen 1,9 und 5,2°C. Dieser große Unsicherheitsbereich wird vorwiegend auf die von Modell zu Modell unterschiedliche Reaktion der Wolken zurückgeführt. Maximale Erwärmungen treten in allen Modellen in bodennahen Luftschichten hoher Breiten auf, weil dort Schnee und Eis teilweise schmelzen. Einige Modelle simulieren eine starke Erwärmung in den oberen Luftschichten der Tropen mit einem Maximum bis zu 8°C in einer Höhe von etwa 10 km (37). Durch das dadurch erhöhte Temperaturgefälle zwischen äquatorialen und polaren Gebieten in der oberen Troposphäre nimmt auch die Intensität des subtropischen Strahlstroms zu.

In allen Modellen intensiviert sich der Wasserkreislauf: Niederschlag und Verdunstung erhöhen sich global um etwa 3 Prozent pro Grad Erwärmung. Die regionalen Strukturen der Niederschlagsänderung sind jedoch sehr komplex und von Modell zu Modell unterschiedlich. Bei einer Mittelung über größere Gebiete, beispielsweise Breitenkreiszonen, nimmt der Niederschlag in niederschlagsreichen Zonen (Tropen, mittlere Breiten) eher zu, während er in den schon vorher niederschlagsärmeren Subtropen weiter abnimmt. Mit ähnlicher regionaler Struktur verändert sich auch der für Land- und Forstwirtschaft wichtige Wassergehalt im Erdboden, jedoch mit jahreszeitlichen Unterschieden über den Kontinenten der mittleren Breiten. Während der Bodenwassergehalt im Winter wegen der höheren Niederschläge zunimmt, setzt im Frühsommer in einigen Modellen eine Austrocknung der Böden wegen stärkerer Verdunstung ein. Diese sommerliche Austrocknung der Kontinente hängt jedoch stark von Modellannahmen über die Feuchtespeicherung im Erdboden ab.

#### 4.6 Zeitabhängige Rechnungen

Die sogenannten transienten Modellrechnungen untersuchen kein hypothetisches Klima, das sich nach einer abrupten Änderung der Konzentration atmosphärischer Treibhausgase einstellt, sondern den zeitlichen Ablauf einer Reaktion des Klimasystems an eine allmähliche Änderung. Damit gewinnen ozeanische Transportprozesse an Bedeutung, wie zum Bei-



spiel die vertikale Vermischung von Wärme oder CO<sub>2</sub>, die in hohen Breiten bis in große Tiefen reicht. Es kann deshalb einige Jahrzehnte länger dauern, bis das Klima auf eine Veränderung der Atmosphäre durch den Menschen mit einem eindeutigen Signal reagiert. Für die realistische Abschätzung zukünftiger anthropogener Klimaänderungen sind daher gekoppelte Zirkulationsmodelle von Atmosphäre und Ozean das geeignete Hilfsmittel. Transiente Rechnungen mit voll gekoppelten Modellen sind jedoch sehr aufwendig und daher nur vereinzelt durchgeführt worden (38).

Die ausführlichste Studie wurde bisher mit einem vereinfachten Modell ohne Ozeandynamik gemacht (39). Der Wärmetransport durch Meeresströmungen wurde fest vorgeschrieben und der Wärmeaustausch mit dem tiefen Ozean mit Hilfe räumlich variabler Diffusionskoeffizienten parameterisiert. Insgesamt wurden drei Treibhausgasszenarien (CO<sub>2</sub> und andere) über einen Zeitraum von bis zu 100 Jahren durchgerechnet, wobei auch ein möglicher Eintrag von stratosphärischem Aerosol durch Vulkanausbrüche berücksichtigt wurde. Im extremsten Fall (exponentielle Konzentrationszunahme aller Treibhausgase) ergab sich gegenüber dem Kontrolljahr 1958 eine globale Erwärmung von etwa 1,5°C im Jahre 2020 und von mehr als 4°C im Jahre 2060. Im anderen Extrem (sofortige Reduktion aller Emissionen und Stabilisierung der Treibhausgas-Konzentrationen nach dem Jahre 2000) nahm die Temperatur bis zum Jahre 2010 noch deutlich zu und stabilisierte sich danach auf einem fast konstanten Niveau, das etwa 0,6 bis 0,8°C über dem von 1958 lag.

Ein weiteres Ergebnis dieser Modellstudie ist, daß die Temperaturerhöhung infolge des Treibhauseffektes in den neunziger Jahren dieses Jahrhunderts deutlich von der natürlichen Klimavariabilität („Klimarauschen“) zu unterscheiden sein wird. Zu beachten ist auch, daß die schnellste Erwärmung nicht in polaren Breiten erwartet wird, wie in den Gleichgewichtsmodellrechnungen, sondern über den tropischen Ozeanen, weil hier der Wärmetransport in den tiefen Ozean infolge der flacheren Deckschicht geringer ist als in hohen Breiten.

Bei der Bewertung dieser Ergebnisse sind jedoch auch die Unzulänglichkeiten des Modells zu beachten, insbesondere die grobe Auflösung von etwa 1000 km und die fehlende Ozeandynamik. Diese Studie ist jedoch wegweisend für die Berechnung zukünftiger Treibhausgasszenarien mit aufwendigeren dynamischen Modellen, wie sie derzeit am Deutschen Klimarechenzentrum in Hamburg durchgeführt werden (vgl. 4. Kapitel, Nr. 5). Als Ergebnis der bisher durchgeführten Modellrechnungen zum Treibhausgasproblem mit gekoppelten Zirkulationsmodellen (40), die teilweise eine noch unkorrigierte Klimadrift enthalten (41), sind insbesondere stärkere regionale Unterschiede der Erwärmung als bei der Verwendung von thermodynamischen Deckschichtmodellen zu erwarten. Möglich sind auch regional und zeitlich begrenzte Abkühlungen. Eine solche Abkühlung ergab die Simulation zum Beispiel für den Bereich des Nordatlantik als Folge einer Abschwächung der Ozean-Zirkulation (42).

## 5. Literaturverzeichnis

1. Bolin, B.; Björkström, A.; Holmen, K.; Moore, B.: The simultaneous use of tracers for ocean circulation studies. *Tellus* Band 35 B, 1983, S. 206-236  
Moore, B.; Björkström, A.: Calibrating ocean models by the constrained inverse method. In: *The Changing Carbon Cycle: A Global Analysis*. Trabalka, J.R.; Reichle, D.E. (Hrsg.), Springer Verlag, New York, 1986, S. 295-328  
Oeschger, H.; Siegenthaler, U.; Schotterer, U.; Gugelmann, A.: A box diffusion model to study the carbon dioxide exchange in nature. *Tellus* Band 27, 1975, S. 168-192
2. Maier-Reimer, E.; Hasselmann, K.: Transport and storage of CO<sub>2</sub> in the ocean – an inorganic ocean-circulation carbon cycle model. *Climate Dynamics* Band 2, 1987, S. 63-90  
verbessert in Bacastow, R.B.; Maier-Raimer, E.: Circulation model of the ocean carbon cycle. *Climate Dynamics* Band 4, 1990, S. 95-125  
sowie Sarmiento, J.L.; Siegenthaler, U.; Orr, J.: 3-d ocean models of anthropogenic CO<sub>2</sub> uptake. Extended abstract of paper presented at the third international conference on analysis and evaluation of atmospheric CO<sub>2</sub> data present and past. Hinterzarten, Oct. 16-20, WMO Environmental Pollution Monitoring and Research Programme, Nr. 59, Genf, 1989
3. Emanuel, R.E.; Killough, G.G.; Post W.M.; Shugart, H.H.: Modeling terrestrial ecosystems in the global carbon cycle with shifts in carbon storage capacity by land-use change. *Ecology* Band 65, 1984, S. 970-983  
Gourdiaan, J.; Ketner, P.: A simulation study for the global carbon cycle including man's impact on the biosphere. *Climate Change* Band 6, 1984, S. 167-192  
Peng, T.-H.; Broecker, W.S.; Freyer, D.D.; Trumbore, S.: A deconvolution of the tree rings base <sup>13</sup>C record. *J. Geophys. Res.* Band 88, 1983, S. 3609-3620
4. Keeling, C.D.: The carbon dioxide cycle: Reservoir models to depict the exchange of atmospheric carbon dioxide with the oceans and land plants. In: *Chemistry of the Lower Atmosphere*. Rasool, S.I. (Hrsg.), Plenum Press, New York, 1973, S. 251-329
5. Esser, G.: Sensitivity of global carbon pools und fluxes to human and potential climate impacts. *Tellus* Band 39 B, 1987, S. 245-260
6. Enting, I.G.; Pearman, G.I.: Description of a one-dimensional carbon cycle model calibrated using techniques of constrained inversion. *Tellus* Band 39 B, 1987, S. 459-476
7. Marland, G.: Fossil fuel CO<sub>2</sub> emissions: Three countries account for 50% in 1986. *CDIAC Communications*, Oak Ridge National Laboratory, Oak Ridge, Tennessee, 1-4, winter 1989, 1989  
Rotty, R.M.; Marland, G.: Fossil fuel combustion: Recent amounts, patterns, and trends of CO<sub>2</sub>. In: *The Changing Carbon Cycle: A Global Analysis*. Trabalka, J.R.; Reichle, D.E. (Hrsg.), Springer Verlag, New York, 1986, S. 474-490
8. Houghton, R.A. u. a.: The flux of carbon from terrestrial ecosystems to the atmosphere in 1980 due to changes in land-use: geographic distribution of the global flux. *Tellus* Band 39 B, 1987, S. 122-139
9. Siegenthaler, U.; Oeschger, H.: Biospheric CO<sub>2</sub> emissions during the past 200 years reconstructed by deconvolution of ice core data. *Tellus* Band 39 B, 1987, S. 140-154
10. Oeschger, H.; Heimann, M.: Uncertainties of predictions of future atmospheric CO<sub>2</sub> concentrations. *J. Geophys. Res.* Band 88, 1983, S. 1258-1262

11. Ramanathan, V. u. a.: Climate-chemical interactions and effects of changing atmospheric trace gases. *Rev. of Geophysics* Band 25 (7), 1987, S. 1441-1482
12. vgl. Schlesinger, M.E.; Mitchell, J.F.B.: Climate model simulations of the equilibrium climatic response to increased carbon dioxide. *Rev. of Geophys.* Band 25, 1987, S. 760-798
13. vgl. North, G.R.; Cahalan, R.F.; Coakley, J.A.: Energy-balance climate models. *Rev. Geophys. Space Phys.* Band 19, 1981, S. 91-122
14. vgl. Peng u. a., 1983  
und Gutowski, W.J.; Wang, W.-C.; Stone, P.H.: Effect of dynamic heat fluxes on model climate sensitivity: meridional sensible and latent heat fluxes. *J. Geophys. Res.* Band 90, 1985, S. 13 081-13 086
15. Ramanathan u. a., 1987
16. Hansen, J. u. a.: Climate sensitivity analysis of feedback mechanisms. In: *Climate Processes and Climate Sensitivity*. *Geophys. Monog. Ser.* Band 29, AGU, Washington, 1984, S. 130-163
17. Manabe, S.; Wetherald, R.T.: Thermal equilibrium of the atmosphere with a given distribution of relative humidity. *J. Atmos. Sci.* Band 24, 1967, S. 241-259
18. vgl. Manabe und Wetherald, 1967
19. Dickinson, R.E.; Cicerone, R.J.: Future global warming from atmospheric trace gases. *Nature* Band 319, 1986, S.109-115
20. Hoffert, M.I. u. a.: The role of deep heat storage in the secular response to climatic forcing. *J. Geophys. Res.* Band 85, 1980, S. 6667-6679
21. Harvey, L.D.D.; Schneider, S.H.: Transient climate response to external forcing on 1-10 000 year time scales, Part 1: Experiment with globally averaged coupled atmosphere and ocean energy balance models. *J. Geophys. Res.* Band 90 (D1), 1985, S.2191-2205
22. WMO/UNEP Intergovernmental Panel on Climate Change (WMO/UNEP IPCC): Bericht der Arbeitsgruppe I „Scientific Assessment of Climate Change.“ Draft Report, März 1990
23. Brühl, C.; Crutzen, P.J.: Scenarios of possible changes in atmospheric temperatures and ozone concentrations due to man's activities, estimated with a one-dimensional coupled photochemical climate model. *Climate Dynamics* Band 2, 1988, S. 173-203
24. Brasseur, G.; De Rudder, A.: The potential impact on atmospheric ozone and temperature of increasing trace gas concentrations. *J. Geophys. Res.* Band 92, 1987, S. 10903-10920
25. Callis, L.B.; Natarajan, M.I.; Boughner, R.E.: On the relationship between greenhouse effect, atmospheric photochemistry, and species distribution. *J. Geophys. Res.* Band 38, 1988, S. 1401-1426  
  
Owens, A.J. u. a.: A coupled one-dimensional radiative-convective, chemistry-transport model of the atmosphere. 1. Model structure and steady-state perturbation calculations. *J. Geophys. Res.* Band 90, 1985, S. 2283-2312  
  
Wuebbles, D.J.; Luther, F.M.; Penner, J.E.: Effect of coupled anthropogenic perturbations on stratospheric ozone. *J. Geophys. Res.* Band 88, 1988, S. 1444-1456
26. vgl. Isaksen, I.S.A. u. a.: Active stratospheric ozone: 2-D model studies. Eingereicht bei *Geophys. Res. Letters*, 1990  
  
Isaksen, I.S.A.; Stordal, F.: Ozone perturbations by enhanced levels of CFCs, N<sub>2</sub>O and CH<sub>4</sub>: A two-dimensional diabatic circulation study including uncertainty estimates. *J. Geophys. Res.* Band 91, 1987, S. 5249-5263
27. WMO: Atmospheric ozone 1985. WMO global ozone research and monitoring project. Report Nr. 16, World Meteorological Organization, Genf, 1986  
  
und Brühl und Crutzen, 1988
28. vgl. z. B. Madronich, S.; Weller: Numerical interaction errors in calculated tropospheric photolysis rates. *J. Atmos. Chem.*, 1990, im Druck
29. im Mainzer Modell, basierend auf Ramanathan, V.: Radiative transfer within the earth's troposphere and stratosphere: a simplified radiative convective model. *J. Atmos. Sci.* Band 33, 1976, S. 1330-1346
30. Oberhuber, J.: An isopycnic global ocean model. Max-Planck-Institut für Meteorologie, Hamburg, 1990, im Druck
31. Washington, W.M.; Meehl, G.A.: Climate sensitivity due to increased CO<sub>2</sub> experiments with a coupled atmosphere and ocean general circulation model. *Climate Dynamics* Band 4, 1989, S. 1-38
32. Sausen, R.; Barthel, K.; Hasselmann, K.: Coupled ocean-atmosphere models with flux correction. *Climate Dynamics* Band 2, 1988, S. 145-163
33. Hansen u. a., 1984
34. Kutzbach, I.E.; Guetter, P.J.: The influence of changing orbital parameters and surface boundary conditions on climate simulations for the past 18 000 years. *J. Atmos. Sci.* Band 43, 1986, S. 1726-1759
35. Mitchell, J.F.B.; Senior, C.A.; Ingram, W.J.: CO<sub>2</sub> and climate: A missing feedback? *Nature* Band 341, 1989, S. 132-134  
  
Wetherald, R.T.; Manabe, S.: Cloud feedback processes in a general circulation model. *J. Atmos. Sci.* Band 45, 1988, S. 1397-1415  
  
Wilson, C.A.; Mitchell, J.F.B.: Simulated climate and CO<sub>2</sub> induced climate change over western Europe. *Climate Change* Band 10, 1987, S. 11-42  
  
Schlesinger, M.E.; Zhao, Z.C.: Seasonal climatic change introduced by doubled CO<sub>2</sub> as simulated by the OSU atmospheric GCM/mixed-layer ocean model. *J. Climate* Band 2, 1989, S. 429-495  
  
Hansen u. a., 1984  
  
Schlesinger und Mitchell, 1987  
  
Washington und Meehl, 1989
36. Hansen u. a., 1984  
  
Wilson und Mitchell, 1987
37. Hansen u. a., 1984  
  
Wilson und Mitchell, 1987  
  
Washington und Meehl, 1989
38. Stouffer, J.; Manabe, S.I.; Bryan, K.: On the climate change induced by a gradual increase of atmospheric carbon dioxide. *Nature* Band 342, 1989, S. 660-662  
  
Washington und Meehl, 1989
39. Hansen u. a., 1984
40. Stouffer u. a., 1989  
  
Washington und Meehl, 1989
41. Washington und Meehl, 1989
42. Washington und Meehl, 1989

### 3. KAPITEL

## Mögliche Auswirkungen des berechneten Temperaturanstiegs

### Einführung

Die vom Menschen verursachten Klimaänderungen werden tief in die natürlichen Ökosysteme und in die menschliche Gesellschaft eingreifen. Die Stärke der Wirkung wird entscheidend von der Geschwindigkeit der Klimaveränderung abhängen, so daß schon eine Verlangsamung des Spurengasanstieges auf lange Sicht wesentlich dämpfend wirkt.

Obwohl bei den bevorstehenden anthropogenen Klimaänderungen eine feste räumliche und zeitliche Zuordnung von Temperatur- und Niederschlagsänderungen nicht gelingt, also auch die Wirkung einer Klimaänderung nicht ausreichend genau zugeordnet werden kann, ist doch aus bekannten Reaktionen bei extremen Wetterereignissen, sehr groben regionalen Änderungen und Analogien aus der Klimageschichte die Wirkung in etwa abzuschätzen.

Welche Pflanzengesellschaften an einem Standort vorkommen wird außer zum Beispiel von den Böden wesentlich von den Klimaparametern Jahresmitteltemperatur und Jahresniederschlag bestimmt. Daher ist davon auszugehen, daß Temperaturänderungen durch den erhöhten Treibhauseffekt der Atmosphäre zu einer Verschiebung der Vegetationszonen führen. Zusammen mit den – aus den Temperaturänderungen resultierenden – Niederschlagsänderungen werden nicht nur Ökosysteme wie die Wälder, sondern auch die Nahrungsmittelproduktion bedroht. Klimaänderungen stellen zudem über die veränderten Extremwerte der Klimaparameter einen weiteren Streßfaktor für Ökosysteme dar, die bereits jetzt durch Schadstoffe belastet sind. Lokale oder regionale Umweltschäden werden daher in den meisten Fällen verschärft auftreten. So würde für einen kranken Baum in Mittelgebirgslagen, der bereits von der Bodenversauerung betroffen ist, bei erhöhter Sonneneindauer nicht nur der Streßfaktor Ozon selbst zunehmen, sondern bei Wasserknappheit auch noch verstärkt wirken und den Baum in einem Dürresommer so schädigen, daß er absterben würde.

Die möglichen Auswirkungen von Klimaänderungen dürfen nicht isoliert bewertet werden, sondern müssen im Zusammenhang mit anderen Problemen, wie weiteren Umweltgefahren und dem Bevölkerungszuwachs gesehen werden. Unter dem Vorbehalt, daß die Wirkungsforschung bislang noch vollkommen unzureichend ist, lassen sich folgende zusammenfassenden Aussagen machen:

#### *Meeresspiegel*

Bei ungebremster Treibhausgasemission steigt der Meeresspiegel durch Ausdehnung des erwärmten

Meerwassers und schmelzende Gebirgsgletscher im Mittel um 6 cm pro Jahrzehnt im nächsten Jahrhundert, wobei der Unsicherheitsbereich von 3 bis 10 cm pro Jahrzehnt reicht. Schon der Anstieg um 20 bis 50 cm bis zum Jahre 2050 bedroht viele niedrig gelegene Inseln und Küstenzonen. Ein Anstieg um 1 Meter bis zum Jahre 2100 würde einige Inselstaaten unbewohnbar machen, Millionen von Menschen aus ihrer Heimat vertreiben, Küstenstädte und fruchtbares Land überfluten, Süßwasserspeicher versalzen und Küstenlinien verschieben. Für einige Länder würden die Kosten für den Küstenschutz bis zu 20 Prozent des Bruttosozialproduktes, in Extremfällen sogar mehr, betragen.

#### *Landwirtschaft*

Obwohl die Untersuchungen bisher noch nicht schlüssig angeben können, ob das Potential für die Nahrungsmittelproduktion zu- oder abnimmt, so ist doch sicher, daß die bevorstehenden Klimaänderungen wichtige regionale Wirkungen haben werden, das heißt in vielen Regionen die Versorgung mit Nahrung gefährden. Speziell gilt das für die schon jetzt leicht verletzlichen Regionen, die sich bekanntlich schlecht anpassen können. In hohen mittleren Breiten der nördlichen Erdhälfte dagegen besteht die Möglichkeit erhöhter Produktivität durch eine verlängerte Vegetationsperiode. Ob und wie stark erhöhter Kohlendioxidgehalt der Luft das Wachstum vieler Pflanzen wesentlich und nicht nur vorübergehend stimuliert, ist noch unklar.

#### *Wälder*

Die existierenden Wälder werden wegen der langen Lebensdauer der einzelnen Bäume immer weniger an das Klima angepaßt sein. Die Vegetationszonen der meisten Waldökotypen werden sich um Hunderte von Kilometern polwärts und die Vegetationszonierung der Gebirge vertikal um hunderte von Metern verschieben, um vorübergehend wieder angepaßt zu sein. Viele Arten werden bei den raschen bevorstehenden Klimaänderungen nicht mitkommen, das heißt die Artenvielfalt wird abnehmen.

#### *Andere terrestrische Ökosysteme*

Auch andere Ökosysteme auf dem Land werden stark unter Druck geraten, weil die bevorstehenden Klimaänderungen ihre Anpassungsfähigkeit überfordern.

*Marine Ökosysteme*

Die Abhängigkeit dieser Ökosysteme von den Windsystemen und der mittleren Windgeschwindigkeit sowie der Tiefenwasserbildung in hohen Breiten macht sie weltweit schon bei geringen Verschiebungen der Windsysteme und Frischwasserzuflüsse in einzelnen Ozeangebieten verletzlich. Die Unkenntnis der Änderungen der Tiefenwasserbildung und des Abflusses von Kontinenten läßt keine regionalisierten Aussagen zu.

*Wasserversorgung*

Geringe Klimaänderungen können vielfach große Probleme bei der Wasserversorgung verursachen, besonders in trockenen Klimazonen oder solchen mit starker Wassernutzung oder -verschmutzung. Wasser und Biomasse als wichtige Energiequelle vor allem für Entwicklungsländer könnten vielfach ab-, teilweise aber auch zunehmen.

*Siedlungen*

Die menschlichen Siedlungen, die bei einer Klimaänderung am meisten gefährdet sind, sind solche, die auch schon jetzt durch Überschwemmung, Dürre und Sürme bedroht sind. Besonders betroffen davon sind die Bevölkerung der Entwicklungsländer und die Bewohner von Marsniederungen, Inseln sowie semiariden Gebieten.

*Gesundheit*

Größere Gesundheitsgefährdungen können speziell in Ballungsgebieten auftreten. Temperatur- und Niederschlagsänderungen werden das Verbreitungsgebiet von Infektionskrankheiten, die durch Tiere übertragen oder durch Viren verursacht werden, drastisch vor allem in Richtung höherer geographischer Breiten verschieben.

Das Kapitel gibt im folgenden nach einer Übersicht über die klimatischen Folgen des zusätzlichen Treibhauseffektes (Nr. 1 und Nr. 2) den heutigen Kenntnisstand der zu erwartenden und möglichen Auswirkungen

gen der Klimaänderungen (Nr. 3). Dabei geht nur Nr. 3.5 „Hydrologie und Wasserwirtschaft“ näher auf die die Bundesrepublik Deutschland betreffenden Auswirkungen ein.

**1. Berechnete globale Klimaänderungen**

Die Konzentration der Diskussion über Klimaänderungen auf den Parameter Temperatur hat mehrere Gründe: Die Lufttemperatur nahe der Erdoberfläche ist erstens ein wesentlicher Klimaparameter, sie ist zweitens mit Klimamodellen vergleichsweise zuverlässig zu berechnen und sie ist drittens am zuverlässigsten von allen meteorologischen Variablen seit mehr als 100 Jahren über großen Teilen der Kontinente und Ozeane gemessen worden. Darüber hinaus ist die Korrelationslänge zum Beispiel der Anomalie der Jahresmitteltemperatur – damit ist der Durchmesser des Gebietes gemeint, über das sich eine Anomalie sich normalerweise ausdehnt – mit einigen hundert Kilometern so groß, daß für verlässliche Aussagen über Trends ein relativ dünnes Meßnetz genügt.

Welche der berechneten Temperaturänderungen sollten als Basis dienen, um die Änderung anderer Klimaparameter und all ihrer Auswirkungen auf Natur und Mensch abzuschätzen? Die Aussage, daß Temperaturangaben aus den komplexesten aller Modelle gerade gut genug seien, führt dabei nicht weiter, denn das komplexeste ist auch das jüngste und meist noch nicht wirklich getestete Modell. Die Probleme beginnen bereits beim einfachsten aller Klimamodelle, nämlich demjenigen, das die Einstrahlung auf den Querschnitt der Erde ( $\pi R^2$ ) der Abstrahlung von der gesamten Oberfläche ( $4 \pi R^2$ ) gleichsetzt und für den atmosphärenlosen Planeten den natürlichen Treibhauseffekt der Atmosphäre berechnen kann. In fast allen Modellen hat man für diese Rechnungen angenommen, daß die Oberfläche dieses Planeten ohne Atmosphäre die Sonnenstrahlung genauso rückstretut wie mit Atmosphäre. Dann steigt die Temperatur durch den Treibhauseffekt der Erdatmosphäre um etwa 34°C. Hätte man, was realistischer ist, die niedrigere Oberflächenalbedo des Mondes oder des Mars als Analogon für den atmosphärenlosen Planeten genommen, wäre das Ergebnis mit etwa 26°C niedriger ausgefallen.

Tabelle 1

**Treibhauseffekt im einfachsten aller Klimamodelle**

Albedo $\alpha$ des atmosphärenlosen Planeten	Absorbierte Sonnenstrahlung $S_0^2) (1 - \alpha) \pi R^{21}$	Emittierte Wärmestrahlung $\sigma T_E^4 \cdot 4 \pi R^{23}$	zugeordnete Temperatur $T_E$	Treibhauseffekt der Atmosphäre
0,30	$1,22 \cdot 10^{16}$ W	$1,22 \cdot 10^{16}$ W	-18 °C	34 °C
0,20	$1,39 \cdot 10^{16}$ W	$1,39 \cdot 10^{16}$ W	-11 °C	26 °C

1) R = Radius der Erde

2)  $S_0$  = Sonnenstrahlung3)  $T_E$  = Temperatur der Erde in Bodennähe

Allein aus dieser einfachen Überlegung folgt, daß Wolken den Planeten insgesamt kühlen könnten, weil die Albedo des Planeten von etwa 0,2 ohne Atmosphäre auf 0,3 mit Atmosphäre angestiegen ist.

Seit Veröffentlichung des ersten Berichtes der Enquete-Kommission im November 1988 ist auf dem Gebiet der Rechnungen mit Klimamodellen und der Diskussion der Unsicherheiten bei der Angabe von Folgen des zusätzlichen Treibhauseffektes Wesentliches geschehen:

- Erstens gibt es gekoppelte Ozean-Atmosphäre-Modelle, die den heutigen Zustand ohne Klimadrift berechnen können und die zu Empfindlichkeitsstudien bei verdoppeltem CO<sub>2</sub>-Gehalt aber auch zu zeitabhängigen Rechnungen mit beobachtetem und erwartetem Spurengasanstieg geeignet sind (vgl. Abschnitt C, 4. Kapitel; (1)).
- Zweitens hat eine großangelegte, internationale, von WMO und UNEP im Rahmen des Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) angelegte Zusammenstellung aller wissenschaftlichen Befunde Fakten und Hypothesen besser voneinander getrennt.
- Drittens ist durch Vergleich mit Beobachtungen von Satelliten aus geklärt worden, daß die Modelle der allgemeinen Zirkulation der Atmosphäre den Strahlungsantrieb und die Wasserdampfrückkopplung im wesentlichen korrekt beschreiben und sich nur bei der Wirkung der Wolken stark unterscheiden.

Deshalb sollen diesem Kapitel über die Wirkungen der Klimaänderungen kurz die wesentlichen Aussagen der Klimamodelle vorangestellt werden.

### 1.1 Temperaturänderungen

Ein Nachweis, daß eine Klimaänderung bereits angestoßen ist, ist lange Zeit nicht möglich, weil die hohe Wärmekapazität des Ozeans und das träge Ansprechen großer Eisgebiete einerseits sowie die starken natürlichen Schwankungen des Klimas andererseits eine Reaktion auf den erhöhten Treibhauseffekt verzögern. Deshalb stützt sich die Diskussion im wesentlichen auf Klimamodellrechnungen. Diese nur auf großen Rechenanlagen einsetzbaren numerischen Modelle müßten im Idealfall alle physikalischen, chemischen und biologischen Prozesse im Klimasystem beschreiben, das heißt, es müßte gekoppelte Modelle des Systems Atmosphäre-Ozean-Biosphäre-Kryosphäre-Lithosphäre geben. Wenn man sich auf Veränderungen in Jahrzehnten und Jahrhunderten beschränkt, wie im Falle des hier diskutierten zusätzlichen Treibhauseffektes, dann kann die Lithosphäre als unveränderlich angenommen werden. Daß man dies bisher auch für die Biosphäre annimmt, ist ein Schwachpunkt der Modelle, ebenso wie die Negierung der chemischen Kreisläufe, etwa des Methans. Trotzdem müssen auch diese vereinfachten Modelle (vgl. 2. Kapitel, Nr. 3.) ein System gekoppelter, nicht linearer Differentialgleichungen bei Rechnungen für Jahrzehnte in Zeitschritten von etwa einer halben Stunde lösen und dabei beachten, daß die Lösung ver-

änderte Randbedingungen, zum Beispiel Schneebedeckung nach Durchzug eines Niederschlagsgebietes, erzwingt. Wenn man zunächst bei gegenwärtiger Zusammensetzung der Atmosphäre und Abstrahlung von der Sonne zum Beispiel über die letzten zehn Jahre eines Modellaufes mittelt, dann kann aus dem Modellergebnis das Klima an jedem der Tausende von Gitterpunkten an der Oberfläche und in der Atmosphäre sowie im Ozean berechnet werden, beispielsweise der Jahresgang und die Schwankungen von Jahr zu Jahr von Temperatur und Niederschlag, die den Boden erreichende Sonnenstrahlung oder die Zahl der Tage mit Schnee. Kommen diese Werte den Beobachtungen nahe, so ist eine Rechnung für veränderte Randbedingungen, zum Beispiel erhöhter CO<sub>2</sub>-Gehalt, mehr als nur mathematische Spielerei. Beim Vergleich mit Beobachtungen stellte sich wie erwartet heraus, daß die Temperaturen – sowohl in Bodennähe als auch an der Ozeanoberfläche, aber auch in der Atmosphäre – noch am zuverlässigsten berechnet werden, daß die Niederschlagsgürtel zwar richtig erfaßt aber regionale Details keineswegs korrekt wiedergegeben werden. Deshalb ist die wissenschaftliche und die öffentliche Diskussion so sehr auf die Klimagröße Temperatur fixiert.

Hier soll nun zunächst als Basis der Diskussion die globale Temperaturänderung bei einem Anstieg der Spurengase beschrieben werden. In den folgenden Abschnitten (Nr. 1.2 bis 1.5) folgt dann das Wichtigste über globale Niederschlagsänderungen, den möglichen Meeresspiegelanstieg, weitere globale Änderungen und neue Extremwertstatistiken.

Die Fülle von einfachen und komplexen Modellen der Atmosphäre sowie die ersten gekoppelten Atmosphäre-Ozean-Modelle erlauben besser als noch vor wenigen Jahren eine Bewertung der Sicherheit der Aussagen der Klimamodelle. So steigt bei unveränderter Struktur der Atmosphäre und einer Verdoppelung des CO<sub>2</sub>-Gehaltes die mittlere Temperatur an der Erdoberfläche in den einfachen Energiebilanzmodellen um 1,1 bis 1,3°C an (2). Dadurch erhöht sich der Wasserdampfgehalt der Atmosphäre unter der Voraussetzung, daß die relative Feuchte konstant bleibt, also die absolute Feuchte bei höherer Temperatur steigt. Unter dieser Voraussetzung nimmt in den Strahlungs-Konvektionsmodellen der Temperaturanstieg auf 1,8°C zu. Verringert sich darüber hinaus bei höheren Temperaturen die Ausdehnung des Meereises, dann erwärmt sich die Erde an der Oberfläche weiter, und zwar insgesamt um 2,2°C. Für wolkenlose Teile der Erde läßt sich aus Satellitendaten die Empfindlichkeit des Klimasystems berechnen. Sie beträgt etwa 0,5°C Temperaturänderung bei einer Veränderung der Strahlungsbilanz um ein Watt pro Quadratmeter (3). Bilden sich bei veränderter Temperaturstruktur andere Wolken an anderen Stellen, so wirkt das in den Modellen der allgemeinen Zirkulation der Atmosphäre auf die Temperaturänderungen zurück. Wegen der geringen Kenntnis über die optischen Eigenschaften der Wolken, vor allem der Eiswolken, und wegen der Schwierigkeiten, die kleinräumigeren Wolken in einem Gitter von 500x500 km<sup>2</sup> korrekt zu beschreiben, ist die Antwort der Klimamodelle sehr unterschiedlich; sie reicht für die sogenannten Gleichgewichtsrechnungen (vgl. 2. Kapitel, Nr. 4.5) von

1,9°C bei Verdoppelung des CO<sub>2</sub>-Gehaltes (4) bis zu 5,2°C (5). Alle 19 allgemeinen Zirkulationsmodelle, die an einem internationalen Vergleich teilnahmen, lagen (vgl. Abbildung 1) zwar nahe beieinander für die wolkenlosen Teile, zeigten jedoch einen von 0,4°C pro Watt pro Quadratmeter bis auf über 1,0°C pro Watt pro Quadratmeter ansteigenden Empfindlichkeitsparameter, wenn die bewölkten Teile eingeschlossen wurden.

Da gegenwärtig die Wolken den Planeten kühlen (7), in den Modellrechnungen aber die besonders stark kühlenden niedrigen Wolken ab- und die hohen erwärmenden zunehmen, ist eine leicht verstärkende Wirkung der Wolken im globalen Mittel wahrscheinlich. Das ist auch der Grund für die vom IPCC (8) gegenüber den früher nur einfach mittelnden Aussagen leicht veränderte Grundaussage:

Steigt der Gehalt der Spurengase so an, daß dies einer Verdoppelung des CO<sub>2</sub>-Gehaltes in der Atmosphäre vom vorindustriellen Wert 280 ppmv auf 560 ppmv gleichkommt, dann erhöht sich die Lufttemperatur in Oberflächennähe bei voller Anpassung des Klimasystems um 2,5°C. Der 1. Bericht der Enquete-Kommission hatte 3,0°C veranschlagt. Die Unsicherheit dieser Aussage wird wie früher durch eine obere Schranke von 4,5°C und eine untere von 1,5°C eingegrenzt, wobei beide Werte als gleich wahrscheinlich gelten. Aus diesem Grund sind auch für die in Kapitel 4 beschriebenen Szenarienrechnungen mit einfachen Klimamodellen Empfindlichkeitsparameter von 1,5, 2,5 und 4,5°C bei CO<sub>2</sub>-Verdoppelung verwendet worden. Diese zentralen Aussagen sind noch immer das Er-

gebnis allgemeiner Zirkulationsmodelle der Atmosphäre mit angekoppelter ozeanischer Deckschicht, jedoch ohne Strömung im Ozean. Erst voll gekoppelte Ozean-Atmosphäre-Modelle können Antworten auf folgende Fragen liefern:

1. Wie stark wird die Erwärmung verzögert?
2. Ist die Erwärmung nach voller Anpassung des gekoppelten Systems Ozean-Atmosphäre gleich hoch wie bei den nur die Atmosphäre betrachtenden Modellen?
3. Ist die regionale Verteilung der Erwärmung stark verändert?

Auf die beiden ersten Fragen gibt es zumindest eine Teilantwort. So erreicht die Erwärmung in einem mit einem Prozent CO<sub>2</sub>-Zunahme pro Jahr angetriebenen gekoppelten Modell (9) nur etwas mehr als 50 Prozent des für den jeweils erreichten CO<sub>2</sub>-Pegel in Atmosphärenmodellen errechneten Wertes. Wir sehen demnach in den Beobachtungen nur die Reaktion auf eine Jahrzehnte zurückliegende Störung. Die Verzögerung beträgt zum Beispiel etwa 30 Jahre, wenn man sie als die Zeit definiert, die vergeht, bis die Erwärmung erreicht ist, die ein Atmosphärenmodell als den Gleichgewichtswert errechnet hätte. Dabei ist berücksichtigt – wie es zum gegenwärtigen Trend bei dem Spurengasanstieg paßt – daß der Strahlungsantrieb weiter zugenommen hat. In Messungen der jüngsten Vergangenheit ist demnach nur die Reaktion auf die Störung etwa zu Beginn der sechziger Jahre zu sehen, als der Antrieb nur etwa halb so groß war wie heute.

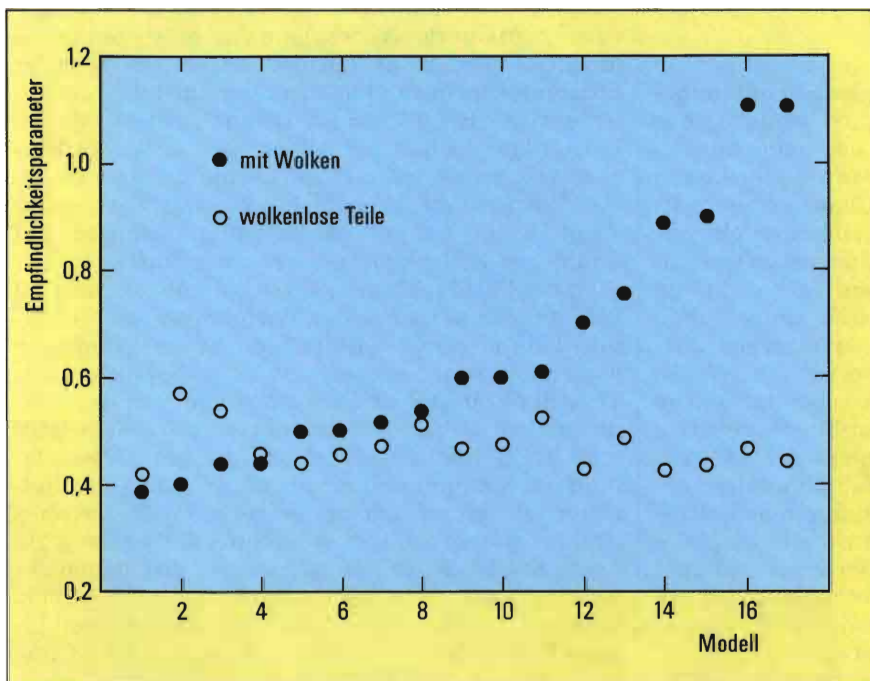


Abb. 1: Empfindlichkeitsparameter von 17 allgemeinen Zirkulationsmodellen der Atmosphäre pro m<sup>2</sup>. Er gibt an, um wieviel Grad die Temperatur steigt, wenn die Strahlungsbilanz um 1 Watt zunimmt. Offene Kreise gelten für nicht bewölkte Teile, geschlossene zeigen den globalen Wert mit Einschluß bewölkter Gebiete (6).

Da die Kopplung des Ozeans und der Atmosphäre so rechenzeitaufwendig ist, gibt es noch keine Rechnung bis zur vollen Anpassung an den aufgeprägten Spurengasanstieg. Alle gekoppelten Modellläufen mit verdoppeltem CO<sub>2</sub>-Gehalt zu Beginn der Rechnung (10) weisen jedoch darauf hin, daß schon nach wenigen Jahren etwa die Hälfte des aus dem zugehörigen Atmosphärenmodell bekannten Erwärmungswertes erreicht, und der Anstieg auch nach einem 30jährigen Zeitraum der Rechnung noch weiter geht. Daher ist nur folgende vorsichtige Aussage möglich: In den bisherigen Modellrechnungen deutet sich keine Dämpfung der Erwärmung an. Der Ozean selbst nimmt Wärme nur auf, verteilt sie unterschiedlich und könnte zu einer Dämpfung nur beitragen, wenn durch ihn die Rückkopplung über die Bewölkung stark verändert würde, was sich in den wenigen wirklich ohne Klimadrift gekoppelten Modellläufen nicht andeutet (vgl. 4. Kapitel, Nr. 5.).

Antworten auf die dritte Frage werden im 4. Kapitel, Nr. 5. gegeben.

Was also hat sich gegenüber dem 1. Bericht der Enquete-Kommission bei den globalen Mittelwerten geändert?

1. Die damaligen Aussagen zur Erwärmung sind nur unwesentlich durch gekoppelte Ozean-Atmosphäre-Modelle geändert worden.
2. Die Unsicherheit der Modelle der Atmosphäre ist hauptsächlich bei der Darstellung der Wolken zu suchen; aber auch der Einfluß der Vegetation muß geklärt werden.
3. Die Verzögerung eines anthropogenen Klimasignals um mindestens drei Jahrzehnte macht Modellrechnungen noch wichtiger und hilft bei der Erklärung, daß der beobachtete Temperaturanstieg von 0,5°C in den vergangenen hundert Jahren nicht der vollen Reaktion auf die Störung entspricht.

## 1.2 Niederschlagsänderungen

Bei höheren Temperaturen kann die Wasserdampfdichte in der Atmosphäre stark zunehmen, so daß bei annähernd gleicher Zirkulation auch die mittlere relative Feuchte konstant bleiben aber die absolute Feuchte mit der Temperatur zunehmen sollte, und zwar um etwa acht bis zehn Prozent pro Grad Temperaturzunahme. Die Zirkulationsmodelle zeigen diese physikalisch plausible Vorhersage etwa konstanter relativer Feuchte ebenfalls. Mit jedem Grad Temperaturänderung nimmt deswegen auch die Niederschlagsmenge global gemittelt zu, und zwar um etwa 2 bis 3 Prozent pro Grad Erwärmung (11). Daß diese Zunahme geringer ausfällt als die allein aus der Feuchtezunahme mögliche, folgt daraus, daß der Anstieg der Verdunstung geringer ist, da

- die Verdunstung in den Trockengebieten kaum ansteigt,
- die Temperatur in den inneren Tropen mit den höchsten Niederschlägen weniger ansteigt als im globalen Mittel und

- sich der Niederschlag in höheren Schichten der Atmosphäre bildet, wobei sich die Temperatur dieser niederschlagsbildenden Schicht kaum ändert.

Mit der Niederschlagszunahme allein ist aber noch keine Aussage über zunehmende oder abnehmende Trockenheit möglich, da erst die Differenz zwischen Niederschlag und Verdunstung darüber Auskunft geben kann. Weil die Niederschlagsgürtel auf der Erde von Modellen nicht so zuverlässig wiedergegeben werden wie die Temperaturzonen und eine Berechnung der Gebietsverdunstung ebenfalls sehr schwierig ist und dazu mindestens ein Mehrschichten-Bodenmodell an die Atmosphäre gekoppelt sein muß, sind Aussagen zur regionalen Wasserbilanz sehr schwierig und werden von den Modellierern nur sehr vorsichtig gemacht (vgl. Nr. 2.2).

## 1.3 Meeresspiegelanstieg

Der Meeresspiegel an einem bestimmten Ort schwankt kräftig mit Gezeiten, Wind, Luftdruck. Mittelt man an diesem Ort über diese oft mehrere Meter, ja sogar bis zu zwanzig Meter betragenden Schwankungen über einige Jahre, so erhält man den mittleren lokalen Meeresspiegel einer Episode, der neben längerfristigen Schwankungen der genannten Parameter drei weiteren Langfriständerungen unterworfen ist:

- der Verformung der Erdkruste;
- der veränderlichen Eismenge auf der festen Erde;
- der Wärmeausdehnung des Meerwassers.

Jeder dieser Prozesse hat bevorzugte Ansprechzeiten, die ersten beiden sogar mehrere. So reagieren kleine Gebirgsgletscher vorzugsweise rasch (in Jahrzehnten), Dauerfrostböden in Jahrhunderten, Inlandeisgebiete (v. a. die Antarktis und Grönland) in Jahrtausenden. Will man abschätzen, wie stark der globale Meeresspiegelanstieg im nächsten Jahrhundert als Folge einer Erwärmung an der Erdoberfläche durch zunehmenden Treibhauseffekt der Atmosphäre sein wird, dann sind von allen Faktoren nur die folgenden wesentlich:

- das Abschmelzen der Gebirgsgletscher;
- die Ausdehnung des Meerwassers;
- die Schrumpfung der kleineren Inlandeisgebiete oder die Zunahme der großen.

Das in allen Gebirgsgletschern gestapelte Eis könnte den Meeresspiegel um etwa 60 Zentimeter anheben; ebensoviel käme durch eine Erwärmung des gesamten Ozeans um nur ein Grad zustande. In den Inlandeisgebieten Grönland und Antarktis stapeln sich Eismassen, die den Ozean um etwa 7 beziehungsweise etwa 65 Meter ansteigen lassen könnten. Während das Abschmelzen von Eis auf den Kontinenten bei unveränderter Temperaturverteilung im Ozean einen gleichmäßigen globalen Meeresspiegelanstieg verursacht, ist die Ausdehnung des Meerwassers je nach Erwärmung und der Eindringtiefe dieser Erwärmung unterschiedlich, so daß beispielsweise bei im Mittel fünf Zentimeter Anstieg durch eine Erwärmung der

Ozeandeckschicht um etwa ein Grad auch Regionen mit zwanzig Zentimeter Anstieg existieren können. Das Abschmelzen von Meereis dagegen ändert den Meeresspiegel nicht, genauso wie ein volles Glas mit Eiswürfeln nicht überläuft, wenn diese schmelzen.

Da es noch keine gekoppelten zeitabhängigen Atmosphäre-Ozean-Kryosphäre-Modelle gibt, ist die Quantifizierung eines zukünftigen Meeresspiegelanstiegs eine nicht in sich geschlossene physikalische Berechnung, sondern eine in mehreren Schritten jeweils unsicherer werdende Schätzung. Dazu muß zunächst die gesamte zur Klimavorhersage genutzte Modellhierarchie durchlaufen, und danach die so berechnete globale Temperaturänderung mit den empirischen Beziehungen zwischen Temperatur- und Meeresspiegeländerungen (zum Beispiel + 15 cm bei + 0,5°C) in einen neuen Meeresspiegel umgerechnet werden. Dabei kann auch etwas detaillierter vorgegangen und die Temperaturempfindlichkeit einzelner Teile der Kryosphäre gesondert abgeschätzt werden.

Das Ergebnis solcher Abschätzungen in Tabelle 2 zeigt, daß der Meeresspiegel bis zum Jahre 2030 fast unabhängig von Eingriffen des Menschen in die Spurengasemission steigt, und zwar schneller als mit den bisherigen etwa 15 cm pro Jahrhundert, daß aber im Jahre 2100 eine Halbierung des Anstiegs wahrscheinlich ist, wenn drastische Maßnahmen ergriffen werden. Die Höhe des Anstiegs hängt natürlich stark von der Empfindlichkeit des Klimasystems bei Spurengaszunahme ab. Daher sind auch die in Klammern gesetzten Zahlen in Tabelle 2 für 1,5°C (links) und 4,5°C (rechts) mittlere globale Temperaturänderungen bei Verdoppelung des äquivalenten CO<sub>2</sub>-Gehaltes realistische Schätzwerte. Der Anstieg um etwa einen halben Meter bis zum Jahre 2100 scheint gering gegenüber den in der Öffentlichkeit genannten, häufig überzogenen Zahlen, er bedeutet dennoch Überschwemmungskatastrophen, Verlust der Heimat für viele Millionen Menschen, massive Verstärkung der Deichbaumaßnahmen, zunehmende Versumpfung

küstennaher Zonen, Eindringen von Brackwasser in Trinkwasserbrunnen und Verlust vieler schützender Küstendünen.

Da die Reaktionszeit der Ozeane und der Inlandeisgebiete Jahrhunderte beträgt, ist mit den in Tabelle 2 genannten Zahlen keineswegs die volle Reaktion auf den Spurengasanstieg beschrieben, sondern nur die Zwischenstation eines weit Nachhinkenden. Wie lange der Meeresspiegelanstieg selbst bei konstanten Spurengaskonzentrationen anhält, ist so wenig gesichert, daß Zahlenangaben über 2100 hinaus nicht gerechtfertigt sind. Abbildung 2 zeigt, welchen Meeresspiegelanstieg sich die Menschheit bis zum Jahre 2030 bereits eingehandelt hätte, wenn von diesem Jahr an jede Emission unterbleiben würde. Der Meeresspiegelanstieg würde sich bis 2100 verdoppeln und hätte dann noch immer den Endstand nicht erreicht.

Aus der jüngeren Klimageschichte ist beispielsweise bekannt, daß seit dem Ende der starken Vereisung vor 18000 Jahren der Meeresspiegel innerhalb von 10000 Jahren um etwa 120 Meter angestiegen ist, obwohl dabei die Mitteltemperatur an der Erdoberfläche nur um 4 bis 5°C zunahm. Da allerdings auf der nördlichen Erdhälfte nur noch vergleichsweise wenig Eis auf Land, nämlich in Grönland, lagert, ist die Empfindlichkeit des Meeresspiegels gegenüber Temperaturänderungen wesentlich geringer geworden. Darüber hinaus ist die Antarktis so weit von großflächigem Abschmelzen in den Randbereichen entfernt, daß eine Erwärmung um wenige Grad bei zunehmendem Niederschlag eher dazu führt, daß sich noch mehr Eis ansammelt, als daß Eismassen verloren gehen. Diese Erkenntnis ist auch in Tabelle 2 enthalten. Daß, wie vor einigen Jahren heftig diskutiert wurde, das unter der Meeresoberfläche verankerte Westantarktische Eisschild bei einem Meeresspiegelanstieg auseinanderbrechen und den Meeresspiegel um fünf bis sieben Meter ansteigen lassen könnte (sowie dies in den Eem-Warmzeit vor 125000 Jahren, als die mittlere Temperatur nur 2° Celsius über dem vorindustriellen Wert lag, geschehen ist), kann zwar nicht als

Tabelle 2

### Anstieg des Meeresspiegels (12)

Anstieg des Meeresspiegels in cm bis zum Jahre 2100 als Folge einer globalen Erwärmung für drei Empfindlichkeiten 1,5, 2,5 bzw. 4,5°C bei Verdoppelung des äquivalenten Kohlendioxidgehaltes der Atmosphäre von 280 auf 560 ppmv und vier Szenarien.

IPCC Szenario (siehe Kapitel 4)	2030			2050			2100		
	(10)	20 <sup>1)</sup>	(32)	(16)	32	(51)	(32)	68	(113)
BAU	(10)	20 <sup>1)</sup>	(32)	(16)	32	(51)	(32)	68	(113)
Br	( 9)	17	(26)	(14)	25	(40)	(22)	46	( 77)
Cr	( 8)	16	(24)	(12)	24	(37)	(18)	39	( 66)
Dr	( 8)	15	(24)	(11)	22	(35)	(15)	33	( 57)

<sup>1)</sup> die mittlere Spalte gibt den wahrscheinlichsten Wert bei folgenden Meeresspiegeländerungen durch Teile der Kryosphäre:  
 1,2±0,6 mm pro Jahr und Grad für Gebirgsgletscher  
 0,3±0,2 mm pro Jahr und Grad für Grönland  
 -0,3±0,3 mm pro Jahr und Grad für die Antarktis.



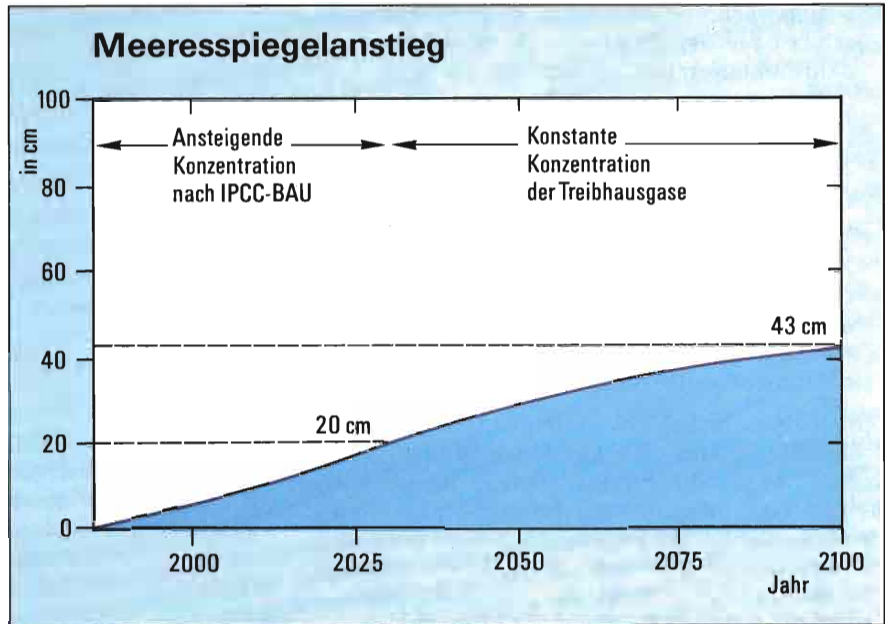


Abb. 2: Meeresspiegelanstieg auch nach vollständigem Emissionsstopp im Jahre 2030 (13).

Falschmeldung bezeichnet werden, ist aber für das nächste Jahrhundert als sehr unwahrscheinlich bezeichnet worden (14). Würde das Schelfeis tatsächlich abbrechen, dann würde der Meeresspiegel über einige Jahrhunderte verteilt ansteigen. Es ist jedoch zu beachten, daß die für das Auseinanderbrechen notwendige Störung der Strahlungsbilanz schon lange vorher angelegt ist, und dann Gegenmaßnahmen nicht mehr möglich sind.

#### 1.4 Weitere globale Änderungen

Jede nicht gleichmäßige Temperaturänderung an der Oberfläche oder in der Atmosphäre beziehungsweise im Ozean verändert die allgemeine Zirkulation in Atmosphäre und Ozean. Denn die Temperaturkontraste in der Atmosphäre sind – zusammen mit Unterschieden im Salzgehalt der Ozeane – Anlaß zur Bildung von Tiefdruckgebieten in Atmosphäre und Ozean. Diese wiederum verändern den polwärts gerichteten Wärmetransport. In einer Atmosphäre mit erhöhtem Treibhauseffekt und sehr unterschiedlicher Erwärmung sollten sich deshalb auch die globalen Zirkulationsmuster ändern. Während es keinen Zweifel darüber gibt, daß der Temperaturkontrast zwischen Äquator und Pol schrumpft, wenn die Zirkulation sich voll an den erhöhten Treibhauseffekt anpaßt, daß die allgemeine Zirkulation also schwächer wird, muß das in der stets Jahrhunderte dauernden Übergangsphase überhaupt nicht gelten. Es ist daher irreführend, Modellergebnisse aus den sogenannten Gleichgewichtsrechnungen einfach zu übernehmen (solchen Rechnungen also, bei denen sich nach mehrfacher Umwälzung die Reaktion auf eine spontane Störung, wie etwa eine CO<sub>2</sub>-Verdoppelung bei längerer zeitlicher Mittelung nicht mehr ändert). Diese Rechnungen zei-

gen stets überdurchschnittliche Temperaturzunahme in hohen geographischen Breiten und folglich insgesamt eine schwächere atmosphärische Zirkulation. In der Übergangsphase dagegen, die nur mit zeitabhängigen gekoppelten Modellen des Ozeans und der Atmosphäre beschrieben werden kann, hängt das grobe Erwärmungsmuster vor allem von der Durchmischung des Ozeans ab, denn die hohe Wärmekapazität des Ozeans verzögert die Erwärmung in den Gebieten kräftiger Durchmischung, und dies ist besonders im Gebiet des Zirkumpolarstroms um die Antarktis, im Nordpazifik und im Nordatlantik der Fall. Daher zeigen alle zeitabhängigen gekoppelten Modelle (15) vergleichsweise kräftige Erwärmung auch in niederen geographischen Breiten und somit keine generelle Schwächung der allgemeinen Zirkulation. Diese Aussage bedeutet auch, daß die Wahrscheinlichkeit für schwere Stürme in mittleren Breiten in der Übergangsphase nicht abnimmt.

#### 1.5 Veränderte Extremwertstatistik

Wetterextreme treffen Landwirtschaft, natürliche Ökosysteme, Siedlungen, Verkehr und Industrieanlagen am stärksten. Jede Veränderung der Extremwertstatistik, zum Beispiel der Häufigkeit von Stürmen, Dürre oder Hochwasser bestimmter Intensität, hat somit unmittelbare Folgen für das Leben auf der Erde. Zur Abschätzung solcher Änderungen in naher Zukunft stehen zur Zeit fast keine Untersuchungen mit Klimamodellen zur Verfügung. Das hat mehrere Gründe:

- Allgemeine Zirkulationsmodelle der Atmosphäre, die ein neues Gleichgewicht nach einer festen vorgegebenen Änderung der Spurengaskonzentration

nen berechnen, sind dazu generell ungeeignet, weil sie nur den Zustand nach voller Anpassung in Jahrhunderten beschreiben.

- Die zeitabhängigen Rechnungen mit Zirkulationsmodellen der Atmosphäre, die realistische Spurengasanstiege vorgeben, erlauben wegen geringer räumlicher Auflösung keine regionalen Aussagen und enthalten den Einfluß der Änderungen ozeanischer Zirkulation nicht.
- Gekoppelte Ozean-Atmosphäre Modelle mit zeitabhängigen Rechnungen, die geeignet wären, sind auf eine Änderung der Extremwertstatistik noch nicht untersucht worden.

Die einzigen bisher bekannten Untersuchungen zur Änderung der globalen Extremwertstatistik (16) benutzen eine zeitabhängige Rechnung mit einem allgemeinen Zirkulationsmodell der Atmosphäre, an das ein Ozeanmodell mit fest vorgegebenem polwärtigem Wärmetransport gekoppelt ist. Bei unvermindertem Spurengasanstieg ergibt die Mittelung über alle Landoberflächen außer der Antarktis:

- Beide Extreme des Wasserkreislaufes nehmen zu, das heißt, es gibt mehr Dürren aber auch mehr besonders niederschlagsreiche Abschnitte, und zwar an fast allen Gitterpunkten des Modells.
- Die besonders stark durch Dürre betroffenen Gebiete sind die mit stark überdurchschnittlicher Erwärmung.
- Die Variabilität des Niederschlags nimmt zu, weil der Anteil konvektiver Niederschläge (Schauer, Gewitter) wächst; diese Zunahme der Variabilität ist aber nicht so ausgeprägt wie die Zunahme der

Dürren, weil bei letzterer auch die stark veränderte Verdunstung noch wichtig ist.

- Der Hauptmechanismus für die Intensivierung der Extreme des Wasserkreislaufes ist die stärkere Aufheizung der Erdoberfläche. In Gebieten besonderer Trockenheit ist diese besonders kräftig.

Da alle Modelle lokale und recht kleinräumige Stürme (Gewitter, Wirbelstürme) mit ihrem Rechengitter nicht mehr auflösen, können zur Zahl oder Intensität dieser Ereignisse keine Angaben gemacht werden. Eine Untersuchung zur Abschätzung der zukünftigen Wirbelsturmintensität zeigt, daß bei einer Erhöhung der Oberflächentemperatur der tropischen Ozeangebiete die Intensität der Wirbelstürme mit hoher Wahrscheinlichkeit zunehmen wird (17). In einem Modell wurde der Kerndruck von Wirbelstürmen berechnet – ein eindeutiges Maß für die Stärke des mit dem Wirbelsturm verbundenen Windfeldes. Dieser berechnete Druck stimmt für heutige Oberflächentemperaturen sehr gut mit der Beobachtung überein. Der bei einer Erwärmung, die verdoppeltem  $\text{CO}_2$ -Gehalt in der Atmosphäre entspricht, berechnete Luftdruck im Zentrum extrem starker Wirbelstürme liegt eindeutig tiefer. Daraus folgt eine um etwa 20 Prozent erhöhte Windgeschwindigkeit, diese wiederum kann – wegen etwa quadratischer Abhängigkeit der Zerstörungskraft von der Windgeschwindigkeit – zu um 40 bis 50 Prozent erhöhten Schäden führen. Es können nach diesen Berechnungen auch Wirbelstürme in Gebieten entstehen, in denen sie heute noch nicht vorkommen, weil größere Gebiete der Meeresoberfläche nördlich von etwa  $7^\circ\text{N}$  und südlich von  $7^\circ\text{S}$  Temperaturen über  $26,5^\circ\text{C}$  aufweisen, einer Grundvoraussetzung zur Entstehung von Wirbelstürmen.

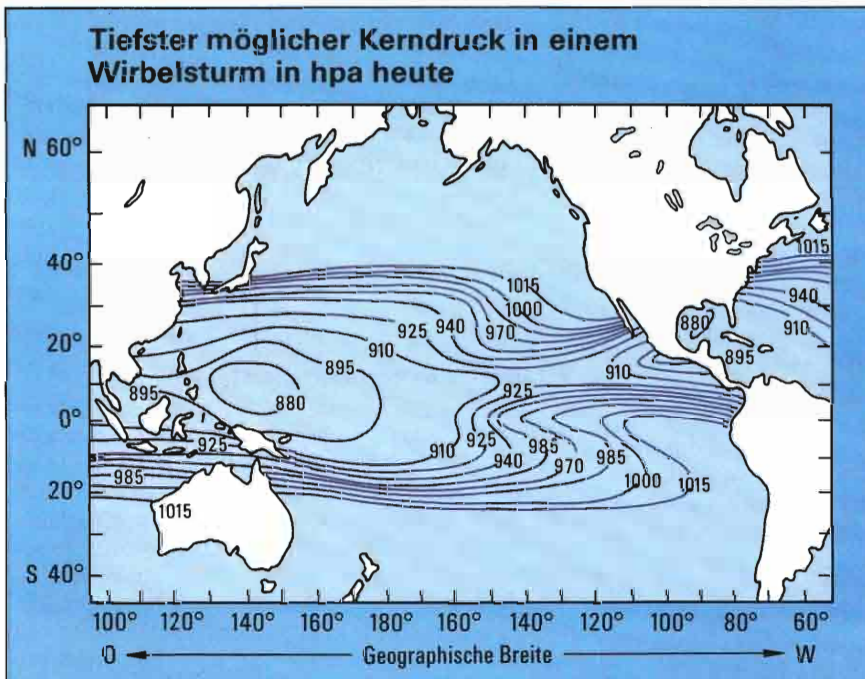
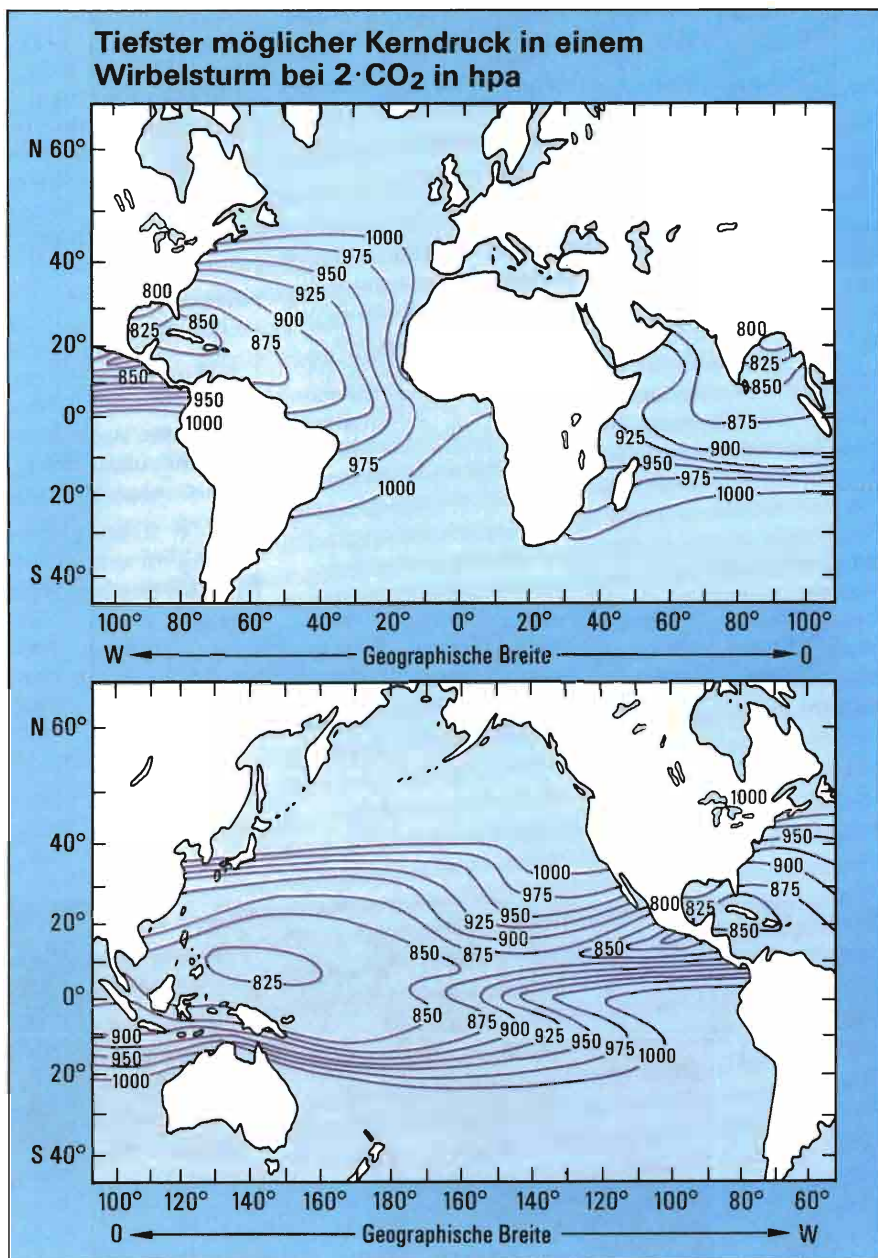


Abb. 3: Tiefster möglicher Kerndruck in einem Wirbelsturm.  
Die beobachteten Werte sind in a. zum Vergleich eingetragen (18).

a. für heutiges Klima



b. bei verdoppeltem äquivalentem CO<sub>2</sub>-Gehalt

Am Äquator selbst kann wegen fehlender Horizontalkomponente der Coriolis-Kraft (ablenkende Kraft aufgrund der Erdrotation) kein Wirbelsturm entstehen. Abbildung 3 kennzeichnet mit den Isolinien des tiefsten möglichen Luftdrucks in Wirbelstürmen die schon jetzt und zukünftig besonders gefährdeten Regionen.

**2. Berechnete regionale und jahreszeitliche Klimaänderungen**

Jeder Bürger wünscht sich Angaben über Klimaveränderungen besonders für seine Region. Doch gerade solche Aussagen sind besonders schwierig, weil zwei zentrale Schwächen der Klimamodelle klare Antwort-

ten generell verhindern: Erstens fehlt es an räumlicher Auflösung und zweitens werden wichtige Teile des Klimasystems nicht beachtet. So können bei 500 km horizontaler Maschenweite des Rengitters kleine Gebirgszüge überhaupt nicht beachtet werden und zum Beispiel in einem 250 000 km<sup>2</sup> großen Gitterelement die Wirkung der darin ablaufenden Schauer oder Gewitter nur angenähert dargestellt werden. Fehlt darüber hinaus der strömende Ozean im Klimamodell, so ist eine Regionalisierung der Effekte generell nicht möglich. Weiterhin ist zu beachten, daß eigentlich nur *zeitabhängige* Rechnungen eines gekoppelten Ozean-Atmosphäre-Modells eine Diskussion über Details sinnvoll machen, diese Art der Modelle aber erst seit etwa einem Jahr einsatzbereit ist. Die folgenden Seiten stützen sich deshalb ganz wesent-

lich auf diese Modellkategorie und interpretieren deren Befunde mit der gebotenen Vorsicht.

Der Jahresgang der Klimaelemente ist in Teilen der Atmosphäre und des Ozeans sehr stark, so daß die korrekte Wiedergabe des Jahresganges in einem sogenannten Kontrolllauf, also für derzeitiges Klima, ein wesentlicher Teil des Gütetests für Modelle ist. Das häufig zu hörende Argument, die in Klimamodellen enthaltenen Parameterisierungen gälten nur für heute, nicht aber in einer sogenannten 2 mal CO<sub>2</sub>-Welt, also einer Welt mit verdoppeltem Kohlendioxidgehalt in der Atmosphäre, ist dadurch teilweise entkräftet, denn wenn im Modell wie in der Wirklichkeit die Stürme im Nordatlantik im Januar den schwachen Tiefdruckgebieten im Juli weichen, so ist eine drastische Änderung korrekt wiedergegeben.

## 2.1. Temperaturänderungen

Die Abweichung der Temperaturänderung vom globalen Mittelwert wird, wie bei heutigem Klima, auch bei im Mittel höheren Temperaturen entlang der Meridiane höher sein als entlang eines Breitenkreises, weil die kräftige Äquator-Pol Differenz (etwa 60 Grad Celsius im Winter) das Charakteristikum der Tempe-

raturverteilung an der Erdoberfläche ist. An der Tropopause (in 8 bis 17 km Höhe je nach geographischer Breite) ist das jedoch anders, denn dort liegt der kälteste Ort über dem Äquator, wenn man von den Wintermonaten im südlichen Polargebiet absieht (vgl. Abbildung 4a). Während bei den früheren Rechnungen mit Zirkulationsmodellen und fest vorgegebener Spurengasstörung, — meist der Verdoppelung des CO<sub>2</sub>-Gehalts der Atmosphäre — generell zu den Polen hin die Temperaturzunahme wuchs, muß diese Aussage jetzt korrigiert werden. Nach Abbildung 4b ist erstens die Erwärmung der südlichen Erdhälfte 30 Jahre nach einer sprunghaften Verdoppelung des CO<sub>2</sub>-Gehaltes von 280 auf 560 ppmv (Millionstel Volumenanteile) geringer als die der nördlichen Erdhälfte und zweitens in beiden Erdhälften die geringste Erwärmung in den Breitenzonen mit kräftiger Durchmischung des oberen Ozeans zu registrieren (vgl. Abbildung 5).

Dieser Befund deutet auch darauf hin, daß sich die Temperaturkontraste vom Äquator bis zu den mittleren Breiten in der gesamten Troposphäre in der Übergangsphase, also in einem sich an eine Spurengasstörung anpassenden System, nicht vermindern werden sondern sich sogar verstärken können. Das wirkt direkt auf die Intensität des subtropischen Strahlstromes in der oberen Troposphäre: er verstärkt sich eher, als daß er abnimmt. Verstärkt er sich, nimmt auch die

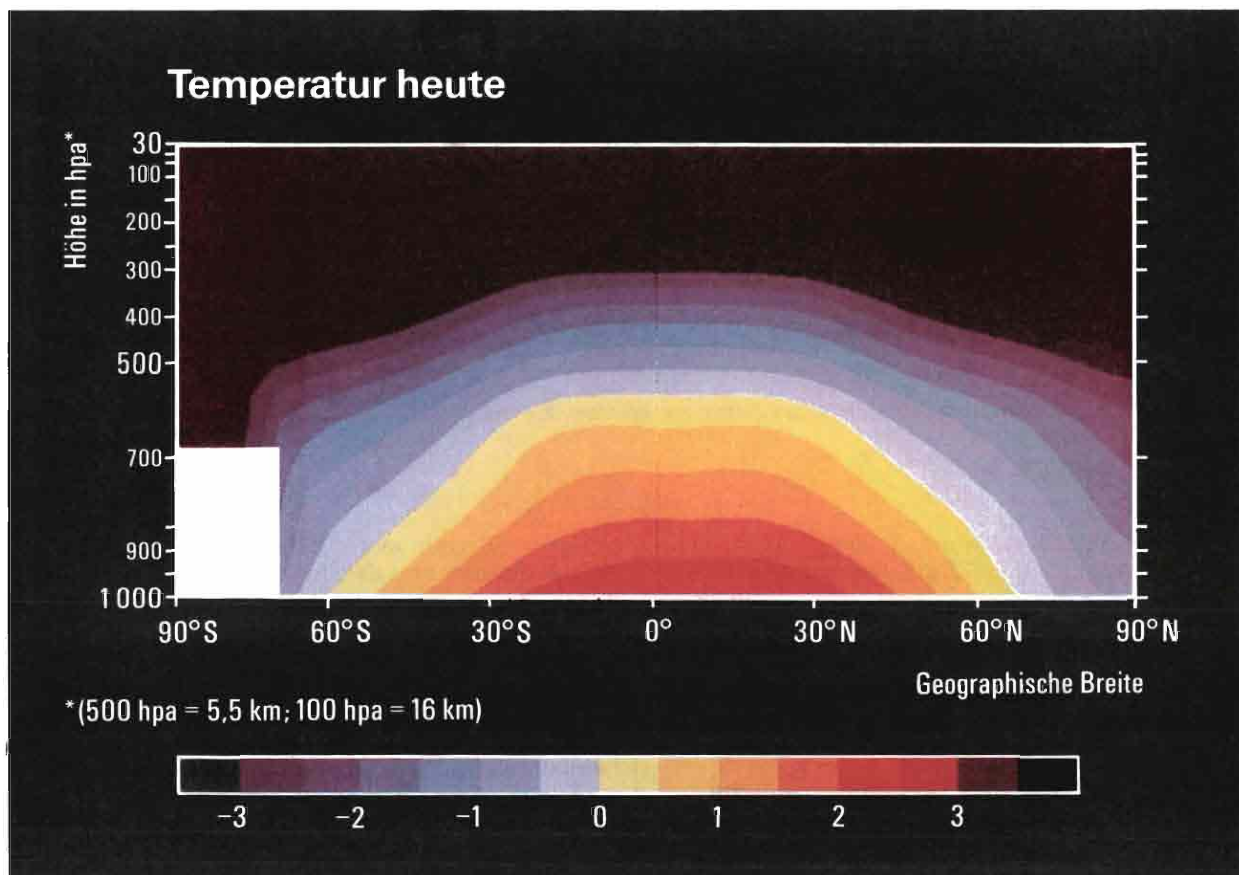
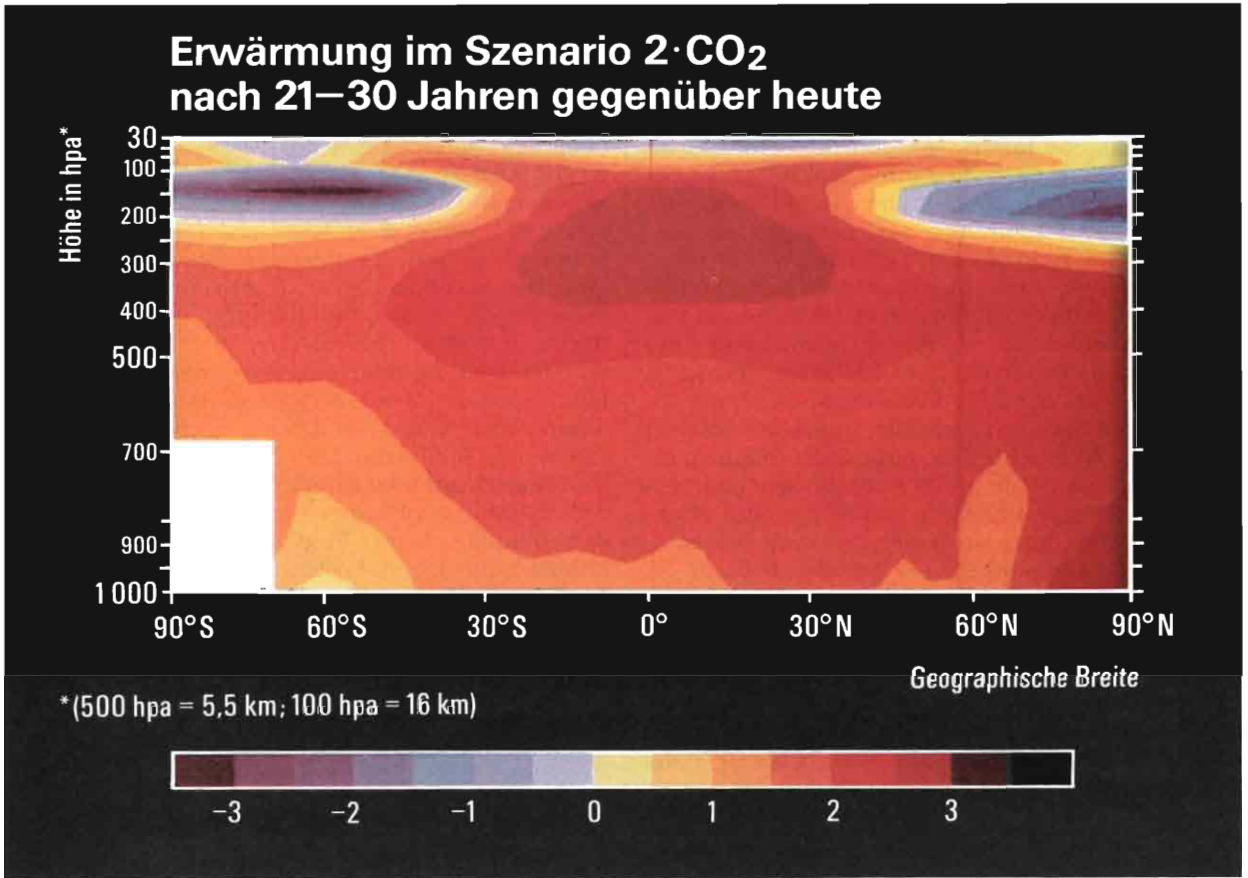


Abb. 4: Zonal gemittelte Temperatur und Erwärmung im Szenario mit Verdoppelung des CO<sub>2</sub>-Gehaltes in der Atmosphäre  
a. berechnete zonal gemittelte Temperaturverteilung in der Atmosphäre



b. zonal gemittelte Temperaturänderung im dritten Jahrzehnt nach der CO<sub>2</sub>-Verdoppelung im gekoppelten Hamburger Klimamodell (19).

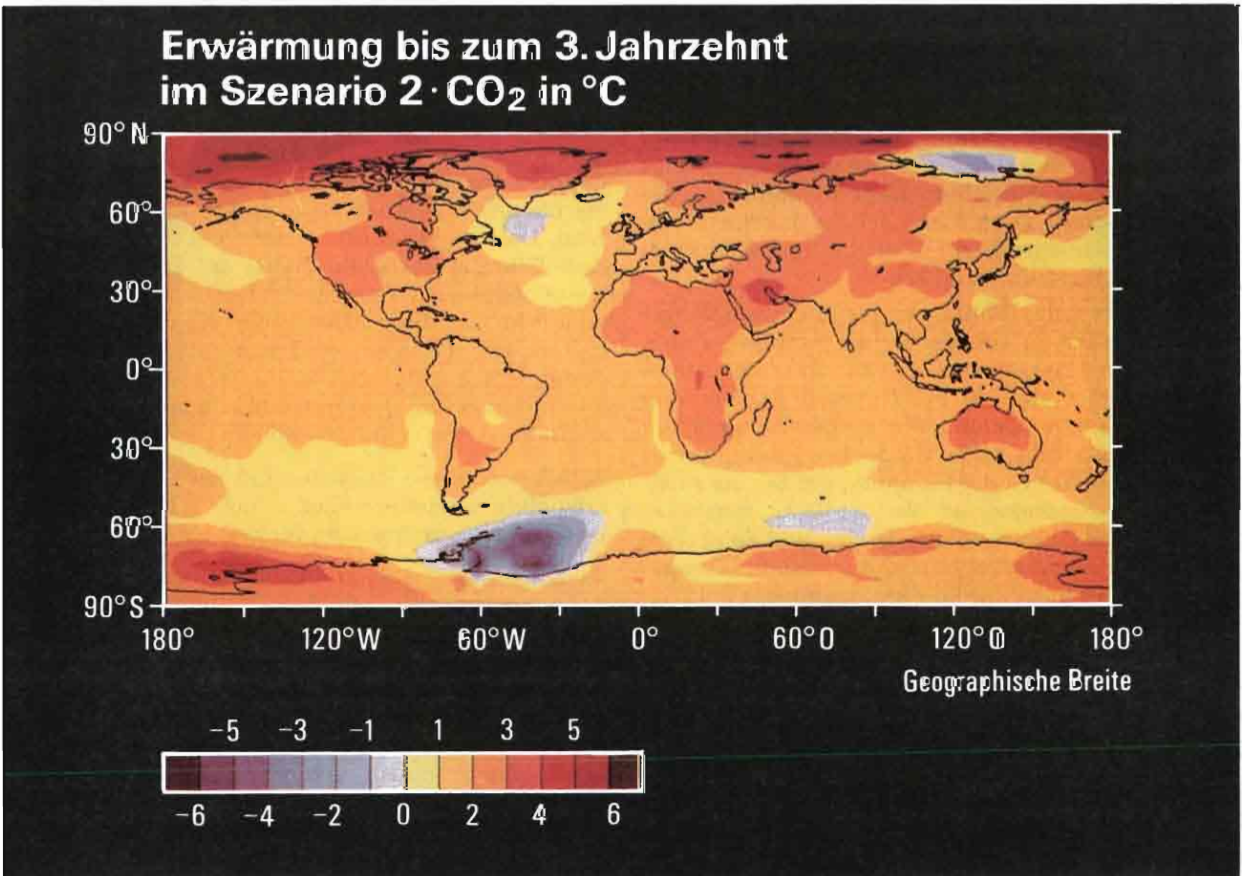


Abb. 5: Änderung der Jahresmitteltemperatur an der Oberfläche in einem gekoppelten Ozean-Atmosphärenmodell für die letzten zehn Jahre einer Koppelung über dreißig Jahre bei spontaner CO<sub>2</sub>-Verdoppelung (20).

Westwinddrift in höheren mittleren Breiten zu. In den Ergebnissen der bisher vorliegenden zeitabhängigen Rechnungen mit gekoppelten Modellen, die sich der Wirklichkeit noch weiter nähern, bleibt diese Aussage erhalten. Lediglich die Temperaturänderungen sind weniger stark und rasch. Während, die beiden Hamburger Modellen nach 30 Jahren bereits 1,5 beziehungsweise 1,9°C Erwärmung beziehungsweise 3,2°C nach 50 Jahren, also die Hälfte beziehungsweise mehr als 80 Prozent des Gleichgewichtswertes des zugehörigen Atmosphärenmodells erreicht hatten, schrumpft diese Zahl in den zeitabhängigen Modellen bei Vorgabe unveränderter Gewohnheiten der Menschen auf etwa 0,6°C nach 30 Jahren und 1,5°C nach 50 Jahren, wenn die Erwärmung durch die vor 1985, also vor Start des Modelles, angelegte Störung mit berücksichtigt wird. Alle bisherigen zeitabhängigen gekoppelten Modelle (21) zeigen jedoch gleichermaßen drei Temperaturmuster bei Störung des Strahlungshaushaltes durch etwa eine Zunahme des äquivalenten CO<sub>2</sub>-Gehaltes um ein Prozent pro Jahr:

- raschere Erwärmung des Inneren der Kontinente im Vergleich zu küstennahen Zonen;
- geringe Erwärmung in Ozeangebieten mit kräftiger Durchmischung (in diesen Gebieten wird Wärme sozusagen im Ozean gestapelt; betroffen sind der südliche Ozean von etwa 35 bis 60°S, der Nordpazifik und der Nordostatlantik);
- die fehlende oder geringe Temperaturerhöhung im gesamten südlichen Ozean verhindert eine kräftige Erwärmung des Meereis-Gebietes um die Antarktis, weil die Rückkopplung zwischen Eisalbedo und Temperatur dann nicht wesentlich sein kann;
- maximale Erwärmung tritt im Norden der großen Kontinente, in Sibirien und im nördlichsten Nordamerika, auf.

Die bisher längste Rechnung für einen Zeitraum von hundert Jahren zeigt ein weiteres bemerkenswertes Ergebnis: die Durchmischung im Nordatlantik läßt bei steigender Spurengasstörung nach, so daß die in diesem Gebiet zunächst geringe Erwärmung zum Ende hin rasch nachgeholt wird (22).

Die Änderung des Jahresganges der Temperatur weicht ebenfalls an einigen Stellen vom gewohnten Bild von den Gleichgewichtsrechnungen der Atmosphärenmodelle ab. Die bei früheren Rechnungen deutlich geringere Amplitude in mittleren und hohen Breiten bleibt nur in hohen nördlichen Breiten erhalten, das heißt, dort ist die Erhöhung der Sommertemperatur weit geringer als die der Wintertemperatur (23). Große Gebiete in den Tropen und Subtropen zeigen sogar leicht erhöhten Jahresgang der Temperatur, was allerdings erst im Zusammenhang mit Niederschlagsänderungen beschrieben werden soll (vgl. Nr. 2.2). Die Diskussion einer feineren regionalen Unterteilung der Temperaturänderungen verbietet sich angesichts der eingangs erwähnten Modellschwächen.

## 2.2 Niederschlagsänderungen

Da Klimamodelle für das gegenwärtige Klima den Niederschlag weit weniger gut als die Temperatur

wiedergegeben, sind über diesen Parameter den Modellrechnungen bei veränderter Zusammensetzung der Atmosphäre noch weniger Details zu entnehmen. Weil jedoch für große Teile der Landoberflächen der Niederschlag der wesentlichste Klimaparameter ist, behindert diese Schwäche der Modelle eine sehr wichtige Diskussion. Hauptfrage bleibt: Werden bei allgemeiner Erwärmung Gebiete noch trockener, die schon jetzt teilweise an Wassermangel leiden? Diese Frage schien in der Ära der Gleichgewichtsrechnungen ohne gekoppelte Modelle angesichts einer generellen Niederschlagszunahme bei erwärmter Erdoberfläche und einer Schwächung des Temperaturgradienten vom Äquator zum Pol zunächst zum Teil falsch gestellt. Denn bei geringerem meridionalen Temperaturkontrast sollte die Zone wandernder Hoch- und Tiefdruckgebiete mittlerer Breiten zugunsten einer Ausdehnung der tropischen Hadley-Zellen-Zirkulation nach Norden zurückweichen. Dies sollte in den äquatorfernen Tropen eine Niederschlagszunahme bringen und höchstens die Sommerdürre im Mittelmeerklima verlängern, dafür aber den vollen Ausgleich im Winter. Auch eine starke Niederschlagszunahme in allen höheren Breiten wegen der weitaus höheren Temperaturen wäre zu erwarten gewesen.

Die gekoppelten Modelle zeigen davon abweichend gemeinsam folgendes Bild:

- Tendenz zu erhöhtem Niederschlag in den inneren Tropen wegen der stärkeren Verdunstung bei höheren Temperaturen;
- im Mittel nicht erhöhter Niederschlag in den semiariden Gebieten;
- Zunahme des Niederschlags in sehr hohen nördlichen Breiten.

Damit nimmt im zonalen Mittel (vgl. Abbildung 6) in schon ausreichend versorgten Gebieten der Niederschlag noch weiter zu, während er in Mangelgebieten eher weiter abnimmt. Der unmittelbare physikalische Grund dafür ist, daß in den gekoppelten Modellen der meridionale Temperaturgradient nicht abgebaut wird. Dieser aber sorgt für eine kräftige allgemeine Zirkulation in der Atmosphäre, die Temperaturkontraste abzubauen versucht und dadurch das vorhandene Muster kräftigt. Der Grund für die Aufrechterhaltung der meridionalen Temperaturkontraste wiederum ist die einige 100 Meter tief reichende Durchmischung im Ozean in den Gebieten mit den Hauptzughbahnen der Tiefdruckgebiete.

Sollten sich diese Aussagen der zeitabhängigen gekoppelten Modelle weiter erhärten lassen, hat das besondere Konsequenzen für die Landwirtschaft.

An dieser Stelle soll darauf hingewiesen werden, daß der Niederschlag durch eine Veränderung der Vegetation verändert werden kann. Durch die Waldrodungen in den Tropen, die derzeit zu etwa 15 Prozent zum zusätzlichen Treibhauseffekt beitragen, wird einerseits CO<sub>2</sub> in die Atmosphäre emittiert und andererseits der Atmosphäre die wichtigste Wasserdampfquelle, die Verdunstung aus den Spaltöffnungen der Blätter der Bäume, genommen. Folglich würden sich die Niederschläge – besonders im Inneren der Kontinente in den Tropen – bei Abholzung um etwa 20 bis 30 Prozent verringern (25).

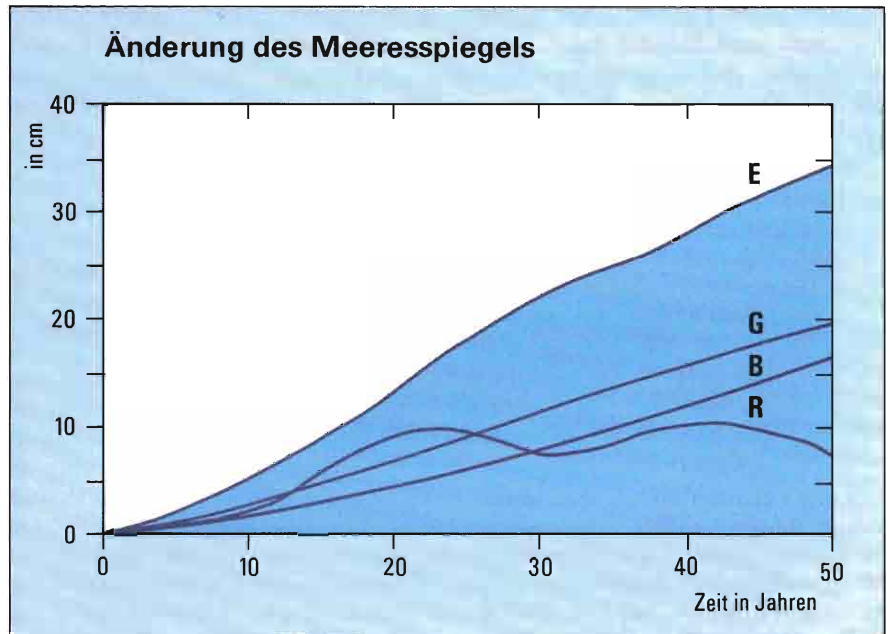


Abb. 6: Änderung des Meeresspiegels verschiedener Regionen durch Ausdehnung des Meerwassers bei vorgegebener Erwärmung für den Fall verdoppelten  $\text{CO}_2$ -Gehaltes (24). E = Nordwest-Europa, C = Global, B = Bengalische Bucht, R = Roßmeer.

### 2.3 Änderung der Meereisausdehnung

Weil sich der Energiefluß zwischen der Oberfläche von Meereis und der Atmosphäre sehr stark von dem zwischen der Oberfläche des offenen Wassers und der Atmosphäre unterscheidet, ist die Meereisausdehnung äußerst wichtig für das Klima des gesamten Planeten. Denn verminderte Temperaturkontraste und gleichzeitiger Rückgang des Meereises wirken, weil sich die Zirkulation abschwächt, sicher zurück auf die mittleren Breiten und, über die dadurch ebenfalls modifizierte Hadley-Zellen-Zirkulation, eventuell sogar auf die Tropen. Bildung, Transport und Abschmelzen von Meereis zu modellieren stellt besonders hohe Anforderungen, denn es muß eine stark verformte Isolations- und Reflexionsschicht simuliert werden, die mit der Meeresströmung transportiert aber vor allem vom Wind verschoben wird, die wachsen oder schrumpfen kann und von größeren Kanälen (Polynien) durchzogen ist. Es ist deshalb nicht erstaunlich, daß die Modellergebnisse stark differieren, vom vollständigen Verschwinden des Eises im Nord- und Südsommer bei Gleichgewichtsrechnungen für eine Verdoppelung des  $\text{CO}_2$ -Gehaltes der Atmosphäre (26), bis hin zum nur leichten Schrumpfen der Ausdehnung aber stärkeren Rückgang der Dicke der Eisflächen in vielen anderen Modellen.

Zu mehr als der Aussage, daß die Meereisausdehnung bei Erwärmung zurückgeht und daß das verbleibende Meereis dünner wird, haben die bisherigen Modellansätze mit Gleichgewichtsrechnungen also nicht geführt.

Ein weiteres Problem entsteht bei der Meereismodellierung in gekoppelten Ozean-Atmosphäre-Modellen ohne Klimadrift, das heißt solchen, bei denen für den

Kontrolllauf die Fehler der Energieflüsse an der Oberfläche zeitabhängig so korrigiert werden, daß beobachtetes Klima gut wiedergegeben wird (27). Unter veränderten atmosphärischen Bedingungen ist diese Korrektur für alle die Rechnungen angemessen, bei denen an einem Ort im Rechengitter nur relativ schwache Veränderungen der Oberflächeneigenschaften auftreten. Verschwindet dagegen Meereis, das, falls von Pulverschnee bedeckt, eine Albedo bis zu 80 Prozent haben und den fühlbaren Wärmefluß aus dem Ozean in die Atmosphäre fast vollständig stoppen kann, und wird es durch offenen Ozean mit einer Albedo zwischen 5 und 10 Prozent sowie – bei Kaltluftadvektion – einem fühlbaren Wärmefluß bis zu 500 Watt pro  $\text{m}^2$  ersetzt, so kann in den gekoppelten Modellen eine neue Klimadrift entstehen. Aussagen aus gekoppelten Modellen zur regionalen Meereisänderung sollten also zur Zeit noch nicht gezogen werden. Vielversprechend ist allerdings der Versuch, das Meereis vom Wind transportieren und verformen zu lassen, denn Tiefenwasserbildung im Ozean bildet sich auch nur in der Nähe vom Meereis (28).

### 2.4 Schwund des Permafrostes

In Gebieten mit einer Jahresmitteltemperatur unter etwa minus einem Grad Celsius kann ein Teil des Bodens ständig gefroren sein, bei Temperaturen von unter minus sieben Grad Celsius ist das immer der Fall. Daher sind insgesamt etwa 25 Millionen Quadratkilometer Boden, überwiegend in Nordasien und Nordamerika, gefroren, große Teile bis zu Tiefen von mehreren hundert, ja bis über tausend Metern. Sie werden Permafrostgebiete genannt. Sie tauen im Sommer nur oberflächlich auf. Etwas weniger als die

Hälfte davon ist sogenannter kontinuierlicher Permafrost, das heißt, daß der Boden nicht nur an Schattenhängen und in Tallagen in einigen Metern Tiefe ständig gefroren ist.

Da allgemeine Zirkulationsmodelle ein Bodenmodell ankoppeln, ist zwar das Gefrieren des Bodens im Winter Modellergebnis, und die für den Sommer errechnete Bodenfeuchte hängt stark von der Behandlung des Auftauverhaltens des Bodens ab, aber eine detaillierte Behandlung von Permafrost enthält keines der Modelle. Da außerdem das Auftauen von Permafrost Jahrhunderte dauern wird, also ein ähnliches zeitliches Problem wie bei der Kopplung von Ozean und Atmosphäre existiert, ist bisher eine Abschätzung des Permafrostschwundes noch auf Analogien in der Klimageschichte angewiesen.

Vor etwa 125 000 Jahren während der Eem-Warmzeit waren riesige Gebiete Sibiriens und kleinere im äußersten Nordosteuropa permafrostfrei. Die globale Mitteltemperatur lag damals etwa um 2°C über der in unserer Warmzeit vor der Industrialisierung (29). Sollte dieses Gebiet erneut zu tauen beginnen, dann ist mindestens für Jahrzehnte Straßen- und Häuserbau stark erschwert.

## 2.5 Weitere regionale Effekte

Ein wesentlicher regionaler Effekt bei Klimaänderungen ist die Änderung der Bodenfeuchte, ein anderer ist ein regional unterschiedlicher Meeresspiegelanstieg. Zu beiden Effekten gibt es Klimamodellrechnungen.

### 2.5.1 Bodenfeuchte

Die gemeinsame Wirkung von Änderungen der Temperatur, des Niederschlags und der Verdunstung sowie des Jahresganges dieser Parameter bestimmt die Änderung der Bodenfeuchte. Da diese für die Landwirtschaft und die Zusammensetzung der Vegetation besonders wichtig ist, wurde recht früh versucht, die Bodenfeuchte während der Vegetationsphase in Klimamodellen zu berechnen. Da die Verdunstung nichtlinear mit der Temperatur steigt, kann trotz höherem Niederschlag die Bodenfeuchte zumindest in Zeitabschnitten sinken. Bei entsprechenden Versuchen, Bodenfeuchte zu berechnen, ergaben schon Gleichgewichtsrechnungen mit sprunghaft verdoppeltem CO<sub>2</sub>-Gehalt der Atmosphäre folgende übereinstimmende Aussagen, die sich auch mit denen gekoppelter Modelle vergleichen lassen:

- Im Winterhalbjahr nimmt in höheren nördlichen Breiten die Bodenfeuchte zu, und zwar wegen stärkerer Niederschläge, erhöhtem Regenanteil daran, früherer Schneeschmelze und einer, bei den niedrigen Wintertemperaturen dieser Region recht geringen Zunahme der Verdunstung;
- Verbreitet stärkere Austrocknung in mittleren Breiten der nördlichen Erdhälfte im Sommer, speziell im Inneren der Kontinente (bei den meisten Modellen).

Diese Aussagen sind wegen der in diesen Regionen liegenden Hauptanbaugebieten für Getreide besonders bedeutend und müssen sorgfältig interpretiert werden. Es fällt auf, daß die Modelle, die eine Verringerung der Bodenfeuchte um etwa 20 Prozent im Bereich von 35 bis 55 Grad nördlicher Breite errechneten solche sind, die im Kontrolllauf für den Spätwinter oder das Frühjahr eine sehr hohe Bodenfeuchte ausweisen. Bei ihnen fließt zusätzlicher Niederschlag im Winterhalbjahr ab. Im Frühjahr trocknet dann der Boden bei hohen Temperaturen und kaum erhöhtem Niederschlag relativ schnell stark aus. Aber auch aus Modellen, in denen sich im Kontrolllauf der Boden im Winter nicht mit Feuchtigkeit sättigt (30), ergibt sich trotz hoher Feuchte im Frühjahr bei erhöhter Verdunstung im Sommer vor allem im südlichen Teil der genannten Breitenzone eine niedrigere Bodenfeuchte im Spätsommer. Bleiben diese Aussagen erhalten, wenn man auf gekoppelte Modelle umsteigt? Ja, da Atmosphären-Modelle die in Gleichgewichtsrechnungen eine starke Verringerung der Bodenfeuchte ausweisen, auch solche sind, in denen die Böden nach einer Koppelung weiterhin trocken bleiben (31). Allerdings ist in dem Modell nach Hansen (32) die Ozeanzirkulation festgehalten.

Da jedoch die Bodenmodelle nur zum Teil Vegetationseffekte direkt beschreiben und einige bei Schneeschmelze und noch gefrorenem Boden zum Teil im Boden das Wasser nicht ganz abfließen lassen, sondern aufnehmen, ist in diesen Teilgebieten die berechnete Änderung der Bodenfeuchte weiterhin nur unsicher anzugeben. Für die tropischen Regionen sind die Aussagen der Modelle zur Bodenfeuchteänderung uneinheitlich und regional sehr unterschiedlich. Hier hängen sie überdies sehr stark von der Vegetation ab. Wird der Boden durch tropische Wälder beschattet, so ist seine Feuchte wesentlich höher als wenn er direkt der Sonnenstrahlung ausgesetzt ist, wie etwa nach der Rodung. Folglich wird die Bodenfeuchte hier entscheidend durch Landnutzungsänderungen beeinflusst (33).

### 2.5.2 Regionaler Meeresspiegelanstieg durch Erwärmung

Ein wesentlicher Teil des bei Erwärmung der Erdoberfläche erwarteten Meeresspiegelanstieges im nächsten Jahrhundert geht zurück auf die Ausdehnung des Meerwassers. Stiege die Ozeantemperatur um 1°C bis zum Meeresboden, dann würde sich der Meeresspiegel um etwa 60 cm erhöhen. Da der Ozean jedoch unterschiedlich schnell in unterschiedliche Tiefen mischt, kann dadurch eine regional sehr unterschiedliche Ausdehnung des Meerwassers und damit eine veränderte Meerestopographie entstehen. In einem ersten Versuch, diesen Effekt zu beschreiben, wurde eine vorgegebene Erwärmung, nämlich der Mittelwert von Gleichgewichtsrechnungen mit sprunghaft verdoppeltem CO<sub>2</sub>-Gehalt der Atmosphäre aus fünf allgemeinen Zirkulationsmodellen der Atmosphäre, einem dreidimensionalen Ozeanmodell aufgeprägt (34). Als überraschendes Ergebnis zeigte sich, daß es Gebiete mit stark überdurchschnittlich steigendem Meeresspiegel, zum Beispiel in Nordwesteuropa, und sogar solche mit zurückgehendem



Meeresspiegel, zum Beispiel vor dem Ross-Schelfeis in der Antarktis gibt. Da die Rechnung keine wirkliche Kopplung darstellt, ist das Ergebnis nicht als strenge Angabe für diese Regionen zu verstehen sondern als Hinweis, daß der globale Meeresspiegelanstieg durch Abschmelzen von Eis von einem regional sehr unterschiedlichen Anstieg durch die Ausdehnung des Meerwassers überlagert wird. Beide Arten des Anstiegs werden im nächsten Jahrhundert bei unverändertem Verhalten des Menschen im Mittel von gleicher Größenordnung sein.

### 3. Wirkungen einer Klimaänderung

Diese Aussagen zu den Auswirkungen von Klimaänderungen stützen sich in erster Linie auf Berichte der Arbeitsgruppe „Impacts“ des Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC = Intergouvernementaler Ausschluß über Klimaänderungen) und spiegeln in vielen Teilen den insgesamt unbefriedigenden Kenntnisstand auf dem Sektor Wirkungsforschung wieder. In diesem Bereich bestehen daher ein erheblicher Forschungsbedarf und die Notwendigkeit einer interdisziplinären Aus- und Bewertung bereits vorhandener Erkenntnisse.

Temperatur und Niederschlag an Land bestimmen die Vegetationszonen, und damit die Anbauzonen für Nahrungsmittel. Klimabedingte Veränderungen der Bedingungen für den Anbau von Nahrungsmitteln werden zu Veränderungen der sozio-ökonomischen Strukturen der betroffenen Länder führen. Um diese abschätzen zu können, muß man die unsicheren Aussagen der Klimatologen, und die der anderen Naturwissenschaftler mit denen der Soziologen und Ökonomen kombinieren. Deshalb ist es unmöglich, eindeutige Aussagen etwa derart zu machen, in Südspanien werde der Weizenbau wegen Wüstenbildung und daraus folgender Unrentabilität eingestellt werden, oder im Süden Schottlands werde Weinbau betrieben werden, weil die Sommer wärmer würden und die Vermarktung wegen der Insellage trotz eines EG-Überangebots günstig sei. Besonders zu beachten sind auch die naturnahen Ökosysteme, wie zum Beispiel die nördlichen Wälder, da ein wichtiges Merkmal der bevorstehenden Klimaänderungen selbst nach mäßiger Verminderung der klimarelevanten Spurengasemissionen, der unnatürlich rasche Wandel des Klimas sein wird, der die Anpassungsfähigkeit von Waldökosystemen bei weitem überschreiten wird. Aufgrund der großen Flächen werden auch künstliche Eingriffe des Menschen diesen Prozeß wesentlich beschleunigen können.

Angesprochen werden müssen auch die Folgen der Auswirkungen der Klimaveränderungen, wie etwa die Flucht aus überschwemmten oder verdorrten Gebieten in die relativen Wohlstandsgebiete oder die Veränderung der wirtschaftlichen Kräfteverhältnisse, wenn ehemalige Getreidelieferanten zu Importeuren werden.

#### 3.1 Terrestrische Ökosysteme

Die Lebensgemeinschaften auf den Landoberflächen sowie die zugehörigen physikalischen und chemi-

schen Umweltparameter sind einem ständigen Wandel unterworfen, der aber im Vergleich zu den vorhergesagten Änderungen relativ langsam abläuft. Bei diesem Anpassungsprozeß wirken die Lebensgemeinschaften selbst wiederum auf das Klima zurück. Bislang beschreiben Klimamodelle diese Rückkopplungen aber nicht (35).

Neben Standort und Boden bestimmt das Klima den Nährstoff- und Kohlenstoffkreislauf sowie die Zusammensetzung der Lebensgemeinschaften und begrenzt damit das Vorkommen bestimmter Vegetationstypen. Die vorhergesagten globalen, aber regional unterschiedlichen, Klimaänderungen können daher tiefgreifende Verschiebungen der terrestrischen Ökosysteme bewirken. Eine modellhafte Beschreibung wie sie bei Klimaänderung reagieren, fällt jedoch äußerst schwer, da:

- Ökosysteme ein Puffervermögen haben, das sie befähigt, Witterungsextreme zu überstehen, das aber bei Andauer oder rascher Wiederholung von Stresssituationen überproportional reagiert,
- Ökosysteme von einem Netz von Wechselwirkungen zwischen verschiedensten biologischen Prozessen aufrecht erhalten werden, von denen unter Umständen nur ein einziger betroffen sein muß, um eine Reaktion der gesamten Lebensgemeinschaft auszulösen,
- die Reaktion auf veränderte Klimaparameter auch von gleichzeitig veränderten Umweltparametern bestimmt wird, wie zum Beispiel vom angestiegenen Kohlendioxid- oder Ozon-Gehalt.

Eine Voraussage wird weiter dadurch erschwert, daß die Modelle nicht ausreichen, regionale Klimaänderung bei Spurengasanstieg genau genug vorzugeben. Dabei reicht die Angabe veränderter Mittelwerte keineswegs aus, weil oft die Niederschlagsverteilung innerhalb eines Jahres ebenso wichtig ist wie die Gesamtmenge. Trotz dieser Schwierigkeiten läßt die Kombination biologischen und klimatologischen Grundwissens in einigen Punkten Aussagen zu, auf die sich Entscheidungen stützen können.

Zentral ist hierbei die Frage nach der Nettoproduktion von Biomasse bei erhöhtem CO<sub>2</sub>-Gehalt und gleichzeitig veränderten Klima.

##### 3.1.1 Nettoprimärproduktion und Speicherung von Kohlendioxid in der Biomasse

Pro Jahr werden durch Pflanzen an Land etwa 60 Milliarden Tonnen Kohlenstoff in neuer Biomasse gebunden, und in den Weltmeeren und Gewässern noch einmal etwa 40 Milliarden Tonnen. An Land sind daran der Wald mit etwas mehr als einem Drittel, Savannen mit einem knappen Drittel und die landwirtschaftlich genutzten Flächen mit nur einem Zehntel beteiligt (vgl. Tabelle 3). Weil die Nettoprimärproduktion die Differenz zwischen Bruttoprimärproduktion (BPP) durch Photosynthese und der Atmung der Pflanzen ist und beide Teilkomponenten unterschiedlich vom Klima sowie vom CO<sub>2</sub>-Gehalt in der Atmosphäre abhängen, gibt es keine einfache Aussage zu bevorstehenden Veränderungen.

Tabelle 3

**Abschätzung der Nettoprimärproduktion (NPP) und der lebenden Biomasse  
in den wichtigsten Ökosystemen (36)**

Ökosystemtyp	Oberflächen		NPP		Biomasse	
	Mio. km <sup>2</sup>	%	Mio. Tonnen Kohlenstoff pro Jahr	%	Mio. Tonnen Kohlenstoff	%
geschlossene Wälder .....	31,3	21,0	33,1	36,6	432,1	76,1
offene Wälder gemäßigter Breiten .	2,0	1,3	1,4	2,3	16,4	2,9
Trockenwald .....	2,5	1,7	1,0	1,5	8,0	1,4
Savannen .....	22,5	15,1	17,9	29,6	66,2	11,7
Steppen .....	12,5	8,4	4,5	7,3	9,2	1,6
Tundren .....	9,5	6,4	1,0	1,6	5,9	1,0
Wüste und Halbwüste .....	21,0	14,1	1,4	2,3	7,5	1,3
extreme Wüsten .....	9,0	6,0	<1	0,1	<1	0,1
Eisgebiete .....	15,5	10,4	0	0,0	0	0,0
Seen und Flüsse .....	2,0	1,3	<1	0,6	<1	0,0
Sümpfe und Marschen .....	2,0	1,3	3,3	5,5	12,0	2,1
Moore .....	1,5	1,0	<1	1,1	3,4	0,6
Kulturland .....	16,0	10,7	6,8	11,3	3,0	0,5
Siedlungen .....	2,0	1,3	<1	0,3	1,5	0,3
Summe .....	149,3	100,0	60,0	100,0	565,4	100,0

Es gibt zudem zwei Pflanzengruppen mit biochemisch recht unterschiedlicher Art der Photosynthese, C3- und C4-Pflanzen, deren Photosyntheserate in unterschiedlichen Ausmaß durch die CO<sub>2</sub>-Konzentration in der Atmosphäre beeinflusst wird. C3-Pflanzen binden das CO<sub>2</sub> an einen Zucker, der 5 Kohlenstoffatome enthält. Die entstandene Verbindung mit 6 Kohlenstoffatomen zerfällt in zwei je 3 Kohlenstoffatome enthaltende Verbindungen (C3). C4-Pflanzen binden dagegen – und zwar räumlich von der Lichtabsorption getrennt – CO<sub>2</sub> an eine C3-Verbindung. Die entstandene C4-Verbindung ist Ausgangspunkt weiterer Umwandlungen.

Für C3-Pflanzen, zu denen etwa 95 Prozent aller Pflanzenarten und fast alle unsere Kulturpflanzen gehören gilt, daß eine CO<sub>2</sub>-Zunahme von 300 auf 600 ppmv das Verhältnis von Bruttoprimaryproduktion zu Atmung während des Tages und somit auch die Nettoprimärproduktion um 10 bis 15 Prozent erhöht, wenn alle anderen Bedingungen erhalten bleiben (37). Für die C4-Pflanzen (zum Beispiel Mais und Zuckerrohr) sollte es dagegen keine erhöhte Photosyntheserate geben. Diese Angaben gelten jedoch nur für Versuche mit vorübergehend erhöhtem CO<sub>2</sub>-Gehalt. Einzelne Versuche mit C3-Pflanzen, die schon bei erhöhtem CO<sub>2</sub>-Gehalt aufwachsen, haben wieder auf Normalwerte reduzierte Photosyntheseraten ergeben. Der CO<sub>2</sub>-Düngeeffekt bei C3-Pflanzen könnte also zumindest zum Teil nur vorübergehend sein (38).

Diese Befunde könnten bei veränderten Temperaturen modifiziert werden, weil es für jede Pflanze eine

optimale Temperatur zur Photosynthese gibt. Je länger an einem Ort die Vegetationsperiode ist, um so höher liegen die Optimal- und die Mindesttemperatur für die Photosynthese der dort typischen Pflanzen. Generell verlangen C4-Pflanzen höhere Mindest- und Optimaltemperaturen als die im gleichen Ökosystem wachsenden C3-Pflanzen (39). Die Differenz der optimalen Temperaturen beruht darauf, daß die Atmung der C3-Pflanzen rascher als die Photosynthese mit der Temperatur steigt. Die Differenz der Minimaltemperaturen hat ihren Grund in der stärkeren Empfindlichkeit der C4-Pflanzen gegenüber niedrigen Temperaturen. Steigende Temperaturen bei sonst ungeänderten Bedingungen verändern also das Gefüge zwischen C3- und C4-Pflanzen. Sie ändern natürlich auch die Bedingungen für alle C3- und C4-Pflanzen untereinander; wärmeliebende zum Beispiel werden sich eher durchsetzen können.

Daß Wasserknappheit die Photosyntheserate vermindert, kann im Zusammenhang mit erhöhtem CO<sub>2</sub>-Gehalt aber einen weiteren wichtigen Effekt haben. Da die Spaltöffnungen der Blätter bei höherem CO<sub>2</sub>-Gehalt und vorgegebenem Lichtpegel zur gleichen Photosyntheserate weniger weit geöffnet sein müssen und damit die Verdunstung reduziert wird, kann die Beschränkung der Biomasseproduktion bei Wasserknappheit gelindert werden. Höhere Temperaturen bei unverändertem Niederschlag allerdings reduzieren, kompensieren oder überkompensieren diesen Effekt je nach Verdunstungszunahme.

Pflanzen, deren Photosyntheserate erhöht wurde, sei es durch Näherung zur optimalen Temperatur, gutes

Nährstoffangebot und genügend Wasser sowie ausreichend Licht, zeigten trotzdem einen Rückgang der Photosyntheserate bei anhaltend günstigen Bedingungen, wohl weil Senken für die Photosyntheseprodukte fehlten (40).

Betrachtet man die Pflanzenatmung als Funktion von Temperatur und  $\text{CO}_2$ -Gehalt, muß berücksichtigt werden, daß erst die Differenz zwischen Bruttoprimärproduktion und Atmung die netto pro Zeiteinheit neu gebildete Biomasse, die Nettoprimärproduktion, ergibt. Ob aber insgesamt mehr Kohlenstoff gebunden wird, kann erst eine Diskussion der Nettoproduktion eines Ökosystems zeigen, die darüberhinaus die sogenannte heterotrophe Respiration (Abbau von Pflanzenmasse) zu beachten hat.

Als Atmung der Pflanzen wird der Prozeß der Nutzung von Kohlehydraten für Wachstum, Unterhalt und Ersatz des Gewebes, Nährstoffaufnahme und Stickstofffixierung bezeichnet. Alle diese Aktivitäten führen zur  $\text{CO}_2$ -Abgabe. Während diese Abgabe in der Wachstumsphase direkt proportional zur Wachstumsrate ist, hängt es danach hauptsächlich von der Gesamtmasse einer Pflanze ab, wieviel  $\text{CO}_2$  bei Unterhalt und Ersatz von Gewebe freigesetzt wird.

Der für die Nährstoffaufnahme veratmete Kohlenhydratanteil ist recht hoch und kann bis zu 60 Prozent der von den Wurzeln insgesamt verbrauchten Kohlenhydrate ausmachen. Die für den Lebensunterhalt verbrauchte Kohlenhydratmenge steigt exponentiell mit der Temperatur an (sie verdoppelt sich bei etwa 10 Grad Celsius Temperaturzunahme), so daß die Temperatur der zentrale Regulator der  $\text{CO}_2$ -Abgabe durch Pflanzen ist (41). Ob erhöhter  $\text{CO}_2$ -Gehalt der Luft die Pflanzenatmung direkt beeinflusst, ist umstritten; gemessen wurde allerdings eine erhöhte  $\text{CO}_2$ -Abgabe bei Dunkelheit nach kurzfristiger Erhöhung des  $\text{CO}_2$ -Gehaltes der Luft und damit erhöhter Photosyntheserate. Zu wenig ist bekannt, um dann auch angeben zu können, wie sich das Kohlenstoff/Stickstoffverhältnis in Pflanzen bei erhöhtem  $\text{CO}_2$ -Angebot verschiebt. Auch das könnte die Pflanzenatmung modifizieren.

Faßt man die Kenntnisse über  $\text{CO}_2$ -abhängige Vorgänge in Pflanzen zusammen, so ist folgende Aussage möglich: Erhöhter  $\text{CO}_2$ -Gehalt der Luft könnte zunächst die Nettoprimärproduktion der Pflanzen – und zwar auch in Ökosystemen mit Wasser- und Nährstoffknappheit – erhöhen. Es gibt jedoch Hinweise, vor allem aus kalten Klimazonen, daß die Pflanzen sich an erhöhten  $\text{CO}_2$ -Gehalt anpassen, der Effekt also abklingt. Im Falle einer Erwärmung im Sommer folgte daraus zunächst eine erhöhte Kohlenstofffixierung durch einen Zuwachs der Photosyntheserate, der stärker ist als der der Atmung, aber auch durch höhere Verfügbarkeit von Nährstoffen wegen rascherer Remineralisierung in Böden. Bei steigender Temperatur im Winter sänke die Nettoproduktion von Biomasse in einem Jahr dagegen wieder wegen der verstärkten Pflanzenatmung in der überwinterten Biomasse. Blicke netto ein Zuwachs, dann müßte das jedoch keine erhöhte Kohlenstoffspeicherung insgesamt bedeuten, weil auch die Abbauraten durch Mikroben und Tiere mit der Temperatur zunehmen.

In einem größeren unberührten Waldgebiet wird im Mittel über mehrere Jahre netto weder Kohlenstoff gespeichert noch emittiert, denn Nettoprimärproduktion von Biomasse und deren Abbau durch Mikroorganismen und Bodenfauna halten sich die Waage. Wird das Ökosystem jedoch gestört, dann kann eine Nettospeicherung oder eine Nettoabgabe auftreten. Typische Störungen sind Klimaänderungen, erhöhter Nährstoffeintrag aus der Luft, Nutzung durch den Menschen. Da insgesamt etwa 500 Milliarden Tonnen Kohlenstoff in Pflanzen, meist Bäumen, gebunden sind und sogar etwa 1500 Milliarden Tonnen im Boden als Humus existieren oder als organischer Abfall auf dem Boden lagern, könnte eine Verkleinerung beider Reservoirs die zur Zeit in der Atmosphäre enthaltene Menge von etwa 740 Milliarden Tonnen Kohlenstoff nachhaltig erhöhen.

Der Abbau von Pflanzenresten an der Oberfläche und im Boden wird sehr stark vom Klima gesteuert. Je wärmer und je feuchter (sofern ohne Staunässe), um so rascher wird organischer Abfall in  $\text{CO}_2$  oder Humus umgewandelt. Der Abbau von Humus wird ebenfalls von Temperatur und Feuchte, aber auch von der Bodenstruktur bestimmt. Während in der Tundra Staunässe über der ständig gefrorenen Bodenschicht die Freisetzung von  $\text{CO}_2$  behindert und somit beherrschender Standortfaktor sein kann, übernimmt in den meisten Wäldern der gemäßigten Breiten die Temperatur und in den trockenen Savannen und Steppen wieder die Bodenfeuchte die Leitfunktion. Der Abbau von Abfall und die Humusbildung in Steppen sind schon so gut verstanden, daß es Simulationsmodelle dazu gibt (42), die auch die Reaktion bei Klimaänderungen abschätzen lassen. So wurde für die Prärien und andere semiaride Gebiete der USA eine Verminderung des Kohlenstoffgehaltes der Böden bei Erwärmung berechnet. Diese Böden sind danach eine Nettoquelle für den  $\text{CO}_2$ -Gehalt der Atmosphäre.

Während die meisten bisherigen Untersuchungen der Kohlenstoffspeicherung in Ökosystemen sich auf junge Wälder beschränkten und dort eine Nettospeicherung von etwa 200 Gramm Kohlenstoff pro Quadratmeter und Jahr fanden, gibt es für eine Reaktion eines natürlichen Ökosystems auf eine Klimaänderung nur eine Versuchsreihe (43) bei der die Verhältnisse in der Tundra im Labor simuliert wurden, sowie Feldexperimente (44), die ebenfalls Tundra untersuchten. Danach wird bei Erwärmung und nicht zunehmender Staunässe netto Kohlenstoff in die Atmosphäre abgegeben; wird gleichzeitig der  $\text{CO}_2$ -Gehalt der Luft erhöht, sinkt die Nettoabgabe, denn zusammen mit der bei Temperaturzunahme erhöhten Nährstofffreisetzung in den Böden steigt auch die Photosyntheserate.

Für andere Ökosysteme gibt es keine ausreichend detaillierten Untersuchungen. Die Kohlenstoffreservoirs von Böden, Wäldern sowie Savannen sind jedoch so groß, daß schon eine geringfügige Änderung von einem Promille pro Jahr, entsprechend etwa 2 Milliarden Tonnen Kohlenstoff, dem Betrag nach der Menge des antropogenen  $\text{CO}_2$  entsprechen würde, den derzeit die Ozeane aufnehmen. Da der  $\text{CO}_2$ -Anstieg den von ihm provozierten Klimaänderungen vorausseilt und da die ersten gekoppelten Ozean-Atmosphäre-Modelle sowie die Beobachtungen (45) keinen

Hinweis darauf geben, daß sich in dieser Übergangsphase der Temperaturgradient vom Äquator zu den mittleren Breiten verringern könnte, sondern eher das Gegenteil, werden trockene Zonen nicht generell feuchter werden. Eine Speicherung zusätzlichen Kohlenstoffs in der Biosphäre an Land ist daher am ehesten in höheren Breiten wahrscheinlich. Diese Hypothese wird gestützt von den Untersuchungen der Trends von Kohlenstoffisotopen (46). Deren zeitlicher Verlauf kann nur durch eine Senke für anthropogenes CO<sub>2</sub> in der globalen Biomasse erklärt werden. Bei noch fehlender starker Erwärmung (wegen der Verzögerung durch den Ozean), aber schon stark gestiegenem CO<sub>2</sub>-Gehalt der Luft ist gegenwärtig eine besonders günstige Konstellation für eine vorübergehende zusätzliche Kohlenstoffsinke in der Biomasse vorhanden.

### 3.1.2 Verschiebung der Vegetationszonen

Die meisten Pflanzenarten sind jeweils an ein bestimmtes Klima besonders gut angepaßt. Schon geringfügige Änderungen, etwa der Temperatur in diesem Jahrhundert, verursachen erkennbare Wanderungen, zum Beispiel eine Anhebung der Waldgrenze in Schweden (47). Während der Eem-Warmzeit vor etwa 125 000 Jahren, als es global gemittelt etwa 2°C wärmer war als in der heutigen Warmzeit vor der Industrialisierung, war das heutige Gebiet der nördlichen Nadelwälder ein Mischwald gemäßiger Breiten. Wie weit die damals unterschiedliche Erdbahnparameterkonstellation (die nördliche Erdhälfte wurde bevorzugt bestrahlt) daran mitgewirkt hat, ist noch unklar. Da die von Klimaänderungen provozierte Wanderung verschiedener Pflanzen und Tiere unterschiedlich schnell abläuft, ist in Übergangsphasen ein Ökosystem anders zusammengesetzt (48) und auch die endgültige Zusammensetzung weicht von der ursprünglichen ab. Es gibt viele eindeutige Beispiele für die Wanderung von Arten im Laufe der Klimageschichte oder auch für ihr Aussterben. Ein Beispiel dafür ist der Rückgang der Baumartenzahl in Europa (z. B. im Vergleich zu Ostasien) durch den Wechsel zwischen Warm- und Kaltzeiten. Die natürliche Wanderungsgeschwindigkeit der meisten Baumarten reicht bei den erwarteten Verschiebungen der Klimazonen auf keinen Fall für eine Anpassung aus. Nach vielen Untersuchungen werden selbst durch Wind verbreitete Samen nicht weiter als 100-200 Meter vom Stamm entfernt zu Boden fallen und dort erst wieder nach Jahren oder Jahrzehnten Samen ausbilden. Eine Verschiebung des Verbreitungsgebietes einer Baumart um Hunderte von Kilometern in einem Jahrhundert ist somit ausgeschlossen.

Leider sind die bisher bekannten Szenarien zur Verschiebung der Vegetationszonen bei erhöhtem Treibhauseffekt der Atmosphäre von den Gleichgewichtsrechnungen der allgemeinen Zirkulationsmodelle mit einer Verdoppelung der CO<sub>2</sub>-Konzentration in der Atmosphäre ausgegangen, die bis 1989 die einzigen dreidimensionalen Modelle darstellten, welche für heutiges Klima getestet waren. Die Ergebnisse haben im Vergleich zu den jetzt bekannten Klimaänderungen bei Berücksichtigung der Ozean-Atmosphäre-Wechselwirkung zwei wesentliche Schwächen: Sie

waren für beide Erdhälften annähernd symmetrisch, und sie enthielten die geringe Erwärmung in der lange dauernden Übergangsphase nahe zu den vergleichsweise tief mischenden Ozeangebieten nicht. Am ehesten treffen diese Aussagen (49) noch in den hohen nördlichen Breiten im Inneren der Kontinente zu, für die die größten Verschiebungen von Vegetationszonen angegeben werden. Aber auch die paläoklimatischen Analogien, die von sowjetischen Wissenschaftlern favorisiert werden, sind nicht direkt übertragbar auf die erwartete Erwärmung. Haupthindernis für die Übertragung ist die Variation der Erdbahnparameter, die je nach Elliptizität der Erdbahn, Neigung der Erdachse zu dieser Bahn und Lage der Ellipse für einzelne Breitenzonen Jahres- und Monatsmittel der Strahlungsflußdichte der Sonne am Oberland der Atmosphäre um bis zu einem Vielfachen der Störung bei verdoppelten CO<sub>2</sub>-Gehalten verändern können. Während der im globalen Mittel um etwa 2°C wärmeren Eemzeit vor 125 000 Jahren genoß die nördliche Erdhälfte, weil im Nordsommer der Sonne am nächsten, die Vorzüge starker Bestrahlung, während heute genau das Gegenteil der Fall ist. Auf einen zur Sonne senkrechten Quadratmeter Fläche fallen zur Zeit im Jahresmittel 1368 Watt pro Quadratmeter, am 3. Januar jedoch 3,5 Prozent mehr und Anfang Juli 3,5 Prozent weniger.

Trotz all dieser Vorbehalte gegenüber einer regionalen Festlegung ist davon auszugehen, daß es bei den prognostizierten Temperaturänderungen zu einer massiven Verschiebung der Vegetationszonen kommen wird. Die maximale natürliche Wanderungsgeschwindigkeit vieler Pflanzen, vor allem der Bäume, reicht nicht aus, rasch genug mitzuziehen, so daß viele Arten unter extremen Druck geänderten Klimas und anderer schneller nachrückender Arten kommen werden und dies für viele das Aussterben bedeuten kann.

Da alle Modellrechnungen, ob gekoppelte, zeitabhängige oder nur stationäre und ungekoppelte, erhöhten Niederschlag und erhöhte Temperatur in hohen nördlichen Breiten angeben, ist die sicherste Aussage über die Verschiebung von Vegetationszonen, diejenige über eine Nordwärtswanderung von Tundra und Taiga, die schon im nächsten Jahrhundert Hunderte von Kilometern betragen kann. Die Verschiebung anderer Vegetationszonen ist wegen der Unkenntnis über die Niederschlagsänderungen im subtropischen und warm-gemäßigten Klima nicht mit ähnlicher Sicherheit anzugeben. Beachtet werden muß jedoch, daß schon geringer Niederschlagsrückgang oder -stagnation bei erhöhten Temperaturen oder nur eine Verlängerung der Sommerdürre bei leicht erhöhtem Gesamtniederschlag massive Folgen für diese Gebiete haben können.

### 3.1.3 Veränderungen in Ökosystemen

Klimaänderungen werden zu einer Veränderung natürlicher Ökosysteme führen. Klimaänderungen führen zu einem Selektionsdruck, dessen Resultat im Rahmen von Anpassungsprozessen wegen der vielfältigen Wechselwirkungen nicht vorhersagbar ist. Sicher ist aber, daß bei diesem Anpassungsprozeß die

Stabilität des Ökosystemgefüges durch daß Auftreten neuer, konkurrierender Arten, neue oder vermehrt auftretende Schädlinge, neue oder aggressivere Krankheitserreger, erhöhte Feuergefahr und Boden-erosion, beeinträchtigt werden kann. Mit zunehmendem Temperaturanstieg wird sich auch das Verbreitungsgebiet tropischer Krankheitserreger polwärts ausdehnen und die Zahl der bekannten Schädlinge in vielen Regionen zunehmen (50). Die im Zusammenhang mit der Vernichtung der tropischen Wälder geführte Diskussion um den Artenverlust muß viel stärker als bisher auch im Zusammenhang mit Temperatur- und Niederschlagsänderungen geführt werden und auch die Wälder gemäßiger Breiten einschließen, in denen – weil bereits in ihrer Fläche extrem reduziert und am Wandern durch Kulturland gehindert – die Artenvielfalt besonders gefährdet ist.

### 3.1.4 Sozioökonomische Folgen

Viele Menschen, die in natürlichen oder naturnahen Ökosystemen leben – dies betrifft vor allem Entwicklungsländer – hängen stark oder ausschließlich von den Nahrungsmitteln, den Baumaterialien, den Arzneien und auch den Kultgegenständen aus diesem natürlichen Ökosystem ab, das ihnen außerdem vielfältigen Schutz bietet und oft die Quelle eines bescheidenen Einkommens ist. Aber auch viele andere Menschen, die in Kulturlandschaften leben, beziehen weiterhin Güter und Schutz aus natürlichen oder naturnahen Ökosystemen. Ändert sich die Zusammensetzung eines solchen Ökosystems, weil das Klima sich ändert, ist ein unentgeltlicher Lieferant von Lebensmitteln und bisher verlässlicher Schutz zum Beispiel vor Hochwasser und Lawinen gefährdet. Als Leistungen des Ökosystems, die bisher nicht im Bruttosozialprodukt der verschiedenen Länder erschienen, die aber bei einer Zerstörung des Ökosystems als Kosten auftauchen, kann man die im Folgenden genannten Beispiele aufzählen.

#### – Wälder und andere naturnahe Vegetation

Wälder sind hinsichtlich Artenzahl, Selbstregulierung und Ausnutzung von Licht, Luft, Wasser und Boden hochentwickelte terrestrischen Ökosysteme. Sie erfüllen auch ohne unmittelbare Nutzung durch den Menschen wichtige Funktionen: Sie dämpfen Wetterextreme, schützen vor Lawinen, verhindern Wind- und Wassererosion und sind Senke für zahlreiche Spurenstoffe.

Hinzu kommt die Nutzung der Wälder als Rohstofflieferant für Holz und viele andere Produkte sowie als Rahmen für die Erholung der Städter. Eine dauerhafte, sogenannte nachhaltige Nutzung ist nur dann gegeben, wenn in einem Gebiet nicht mehr entnommen wird, als nachwächst und wenn entstandene Freiflächen sich regenerieren können oder bepflanzt werden. Die noch vorhandenen Wälder auf etwa 40 Millionen km<sup>2</sup> werden nur teilweise genutzt (vgl. 2. Bericht der Enquete-Kommission). Weltweit insbesondere in den Tropen und Subtropen überwiegt hierbei die Brennholznutzung (vgl. auch Tabelle 5), in den

stark bewirtschafteten Wäldern der nördlichen Industrieländer die Nutzholzgewinnung für Bauten, Holzprodukte, Papier und Zellstoff. Im tropischen Asien allein werden 500 Millionen Kubikmeter Brennholz pro Jahr verbraucht und weitere 100 Millionen Kubikmeter werden anderweitig genutzt, was zum Beispiel 5 Milliarden US-Dollar Devisen erwirtschaftet.

Holz ist nicht der einzige Rohstoff, den Wälder liefern. In vielen Entwicklungsländern hängen ganze Wirtschaftszweige von Nicht-Holzprodukten ab. Dieser häufig wenig beachtete Teil der Nutzung eines Waldes wird relativ rasch Klimaänderungen spüren, weil einige dieser Produkte, wie Früchte, Nüsse, Kautschuk, Vogelfedern und Arzneipflanzen Frühindikatoren für Veränderungen sind. Diese Produkte spielen vor allem eine Rolle bei einer schonenden Nutzung empfindlicher tropischer Feuchtwald-Ökosysteme.

Die Tragfähigkeit von Weideland in den Trockengebieten vor allem in Afrika ist bereits heute erschöpft und in vielen anderen semiariden Gebieten erreicht. Geringfügige Änderungen der Niederschlagsmenge und die Niederschlagsverteilung können daher über die weitere Existenz der Nomadengesellschaften in Afrika entscheiden (51).

Die Zunahme der Wald- und Buschbrände wird von vielen Wissenschaftlern (52) als eine der wesentlichen Bedrohungen der durch Klimaänderungen und andere menschliche Eingriffe gestörten Ökosysteme gesehen. Von 1980 bis 1986 brannten zum Beispiel im Mittelmeerraum vor allem während der Sommerdürre jährlich im Mittel 6 500 Quadratkilometer nieder, bei einem Schaden von jeweil 1.2 Milliarden US-Dollar.

#### – Feuchtgebiete

Der Verlust von Feuchtgebieten wie Mangrovwäldern, Watten, Sümpfen, Flußauen, Deltas durch den erwarteten Meeresspiegelanstieg (vgl. Nr. 3.7) und durch gebietsweise verringerten Niederschlag als Folge einer Klimaänderung würde zu Feuchtgebietsverlusten durch Trockenlegung, Eindeichung, Dammbau, Kanalisierung, Torfstich und Zuschüttung hinzukommen. Schon jetzt ist die Ausdehnung der Feuchtgebiete etwa halbiert worden. Die Fischerei könnte davon betroffen sein, zum Beispiel weil Wattengebiete die Kinderstube vieler wichtiger Speisefischarten sind und Mangrovwälder zur Fischerei genutzt werden. Zugvögel könnten durch das Verschwinden ihrer Rast- und Futterplätze bedroht und der Küstenschutz erschwert werden, weil Sturmfluten höheren Schaden verursachen. Für die USA schätzte man ab, daß jeder Kilometer eines einen Kilometer breiten Feuchtgebietes mehr als 40 000 US-Dollar Sachschaden bei einem Wirbelsturm verhindert (53).

#### – Der Wert natürlicher Umgebung

Ursprüngliche, weitgehend unberührte Ökosysteme mit seltenen Tier- und Pflanzenarten haben nicht nur ästhetischen Wert und dienen der Bevölkerung industrialisierter Gebiete zur Erholung, sondern stellen auch in vielen Ländern die Lebensgrundlage indige-

ner Gesellschaften. Darüber hinaus haben sie, wie zum Beispiel für den Tourismus in Kenia und Equador, hohe wirtschaftliche Bedeutung.

Indem Klimaänderungen zu Veränderungen natürlicher Ökosysteme führen, wird zum Teil auch das Schutzziel von zum Beispiel Nationalparks, Naturschutzgebieten und Naturdenkmälern überdacht werden müssen. Es stellt sich die Frage, ob ein Ökosystem in der bisherigen Form erhalten werden kann und soll, oder ob das Schutzziel den veränderten Bedingungen angepaßt werden soll.

### 3.2 Marine Ökosysteme

Die biologische Produktivität des Ozeans ist trotz der geringen Menge der in ihm schwebenden einzelligen Pflanzen, den Algen, hoch. Nur etwa 3 Milliarden Tonnen Kohlenstoff sind in den lebenden Algen enthalten, sie binden aber jedes Jahr etwa 40 Milliarden Tonnen Kohlenstoff. Die Einzeller verdoppeln sich aber häufig und sterben rasch wieder ab. Für den globalen Kohlenstoffkreislauf sind sie also ein wichtiges Teiglied. Diese Primärproduktion von Biomasse durch Algen im Ozean hängt hauptsächlich von Nährstoffen und Sonnenlicht bei Wellenlängen unter 685 nm ab, jedoch nur relativ schwach von der Temperatur. Letzteres wird eindeutig von intensiven Phytoplanktonblüten (einer raschen Vermehrung der Algen) an der Meereiskante bei Temperaturen von minus 1,9°C belegt. Das Nährstoffangebot wird stark vom Klima bestimmt, denn fruchtbar ist der Ozean nur in den Gebieten wo nährstoffreiches Wasser hochquillt oder von Flüssen geliefert wird. Wo und wann welche Mengen an Nährstoffen hochquellen, bestimmt die allgemeine Zirkulation des Ozeans, die vom Wind und von der Verteilung der Differenz aus Niederschlag und der Verdunstung über dem Ozean sowie dem Abfluß von den Kontinenten abhängt. Die allgemeine Zirkulation der Atmosphäre bestimmt also auch darüber mit, wo und wann sich welche Algen verdoppeln können. Damit ist eine Klimaänderung von großer Bedeutung für die marinen Ökosysteme, die an Algen als der Basis der Nahrungskette gebunden sind. Aus der Klimageschichte ist klar erkennbar, daß zum Beispiel der Nordatlantik beim Übergang von der Zeit intensiver Vereisung zur jetzigen Warmzeit seine Zirkulation grundlegend verändert hat (54), wobei Änderungen in der Häufigkeitsverteilung des Phytoplanktons sogar als Verstärker wirken können. Die Tiefenwasserbildung, zur Zeit fast nur auf den Atlantik beschränkt, war vor 18 000 Jahren im Atlantik beinahe vollständig unterbunden. Daß sie zum Beispiel in der Grönlandsee zwischen Spitzbergen und Grönland stattfinden kann, liegt an dem relativ hohen Salzgehalt des in mittleren Schichten einströmenden, relativ warmen Atlantikwassers. Kommt dieses Wasser gefördert von den Vertikalbewegungen in ozeanischen Wirbeln in Oberflächennähe, kann es von kalter über die Eiskante im Winterhalbjahr strömender Luft so abgekühlt werden, daß es dichter als darunterliegendes Wasser wird und in die Tiefsee absinkt.

Paläoklimatische Befunde zeigen eindeutig, daß die Phytoplankton- und damit die Zooplanktonverteilung in Warm- und Kaltzeiten sehr unterschiedlich ist. Da-

her ist eine Erwärmung des oberflächennahen Ozeans Anlaß zu weiterer polwärtiger Wanderung der marinen Lebewesen. Da bei Klimaänderung auch die Ozeanzirkulation variiert und bei Erwärmung die tiefreichende Konvektion sowie die Mischungstiefe zurückgehen könnten, ist eine globale Abnahme der Produktivität nicht ausgeschlossen.

Bei einem Rückgang des Meereises sind alle an diese Umgebung angepaßten Lebewesen von den Algen bis zu den großen Säugetieren gefährdet (55). Obwohl die Primärproduktion bei fehlendem Meereis erhalten bleiben könnte, sind doch die Planktonblüten an der Meereiskante im Frühjahr wichtig für den Lebenszyklus vieler höherer Lebewesen und ganz sicher wesentlich für den Kohlenstofffluß in die Tiefsee und die Sedimentation am Meeresboden. In den gemäßigten und hohen Breiten ohne Meereis ist eine Aussage über die Wirkung einer Klimaänderung auf das marine Plankton zur Zeit nicht möglich (56), denn diese Region ist durch außergewöhnliche Variabilität charakterisiert. Aus langen Meßreihen ist bekannt, daß Vorkommen und Produktivität bestimmter mariner Ökosysteme stark von den Vorgängen in der Atmosphäre abhängen. Die Abnahme des Plankton in den Jahren 1950 bis 1980 in Gewässern um Großbritannien ist hoch korreliert mit Windgeschwindigkeits- und Windrichtungsänderungen (57). Nach solchen Untersuchungen sollten eine Erwärmung des oberflächennahen Meerwassers und zugehörige Zirkulationsänderungen einen starken Einfluß auf die marinen Ökosysteme haben. Auch eine Verschiebung der Planktonarten kann hohe Klimarelevanz haben. So sind zum Beispiel Diatomeen, die typischerweise in kalten nährstoffreichen Gewässern auftreten, wegen ihrer relativ hohen Sinkgeschwindigkeit aufgrund ihres Kieselsäurepanzers an stark durchmischte, also turbulente, Deckschichten gebunden. Fehlen sie als bevorzugte Nahrung für viele andere Lebewesen, dann kann nicht nur die Fischpopulation stark betroffen sein (58), sondern auch der Kohlenstofffluß in den Ozean.

### 3.3 Landwirtschaft

Die offenkundige und starke Abhängigkeit der landwirtschaftlichen Erträge, der angebauten Sorten und der Anbaupraktiken vom Klima ist bisher bei fast allen Untersuchungen nur im Lichte der Reaktion auf die Wetterextreme, einem Teil des als nur sehr langsam veränderlich betrachteten Klimas gesehen worden. Die Wirkung systematisch veränderten Klimas auf die Landwirtschaft ist erst jüngst Teil der Untersuchungen geworden. Dabei waren einerseits die beobachtete Reaktion auf Wetterextreme und andererseits die Vorgabe bestimmter Änderungen des Klimas und des CO<sub>2</sub>-Gehaltes Basis der Abschätzung.

Die folgenden Abschätzungen gehen wie der Bericht des IPCC von einer ungebremsten Zunahme der Emission von Treibhausgasen aus, die schon etwa im Jahre 2025 zu einer Verdoppelung des äquivalenten CO<sub>2</sub>-Gehaltes führte, sowie auf die dafür von Klimamodellen berechneten Temperatur- und Niederschlagsänderungen (2 \* CO<sub>2</sub>-Klimamodell). Allerdings tritt eine zusätzliche Schwierigkeit auf, weil sich

die Aussagen zu Klimaänderungen in diesem Bericht stärker auf die jetzt auch in der Bundesrepublik Deutschland vorhandenen gekoppelten Ozean-Atmosphäre-Modelle abstützen, während im IPCC-Bericht noch die Ergebnisse der  $2 \cdot \text{CO}_2$  Gleichgewichtsrechnungen mit Zirkulationsmodellen der Atmosphäre und einer angekoppelten nicht strömenden Ozeandeckschicht Grundlagen waren. Wo notwendig, wird dieser Unterschied beachtet und angegeben.

Da Klimaänderungen nicht abrupt eintreten, sondern sich – für die Landwirtschaft besonders bedeutend – in einer systematisch veränderten, neuen Extremwertstatistik und in langsam veränderlichen Mittelwerten von Temperatur und Niederschlag äußern, sollte auch die ohne Klimaänderung in den nächsten 50 bis 100 Jahren ablaufende Änderung der Agrartechnologie und der Organisation der landwirtschaftlichen Produktion beachtet werden. Diese Veränderungen sind noch schwieriger vorhersehbar als Klimaänderungen, deshalb beschränkt sich die variable Bezugsbasis hier hauptsächlich auf die Fortschreibung der Bevölkerungsentwicklung und bezieht nicht den zukünftigen Düngemiteleinsatz und die zukünftige Anbaufläche mit ein.

Hauptvorgaben einer regionalen Klimaänderung neben den globalen Änderungen (vgl. Nr. 1) sind:

- überdurchschnittliche Erwärmung in hohen nördlichen Breiten vor allem im Inneren der Kontinente (Aussage gegenüber Gleichgewichtsrechnungen teilweise verändert);
- Verstärkung der Monsunzirkulation (gestützt von gekoppelten Modellen);
- reduzierte Bodenfeuchte in Teilen der Subtropen und (teilweise gestützt von gekoppelten Modellen) im Sommer mittlerer Breiten besonders im Inneren der Kontinente.

Weil die weitere Regionalisierung der Temperatur- und Niederschlagsänderungen noch keineswegs sicher ist, muß für die Abschätzung einer Wirkung auf die Landwirtschaft eine besondere Form der Beurteilung gewählt werden. Zunächst wird derjenige Klimaparameter identifiziert, welcher am stärksten wirkt, dann werden die empfindlichsten Gebiete benannt, danach die Wirkungen vorgegebener Änderungen abgeschätzt und schließlich die mögliche Reaktion auf solche Wirkungen untersucht.

### 3.3.1 Gegenwärtige Klimaempfindlichkeit und Risikogebiete

Zu niedrige Temperatur und zu wenig Niederschlag begrenzen die Vegetationsperiode. Auf 63 Prozent der Fläche aller Entwicklungsländer könnten unbewässertes Anbau oder Viehzucht betrieben werden (51), wobei Schwankungen von 53 Prozent für Afrika bis zu 85 Prozent für Südamerika auftreten (59). Speziell in Südwestasien ist die Situation am ungünstigsten: 17 Prozent sind zu gebirgig oder zu kalt, 65 Prozent sind zu trocken und nur 18 Prozent könnten prinzipiell landwirtschaftlich genutzt werden.

Nimmt man die Fläche mit ungeeigneten Böden hinzu, dann gibt es viele Gebiete, wo schon bei einer

geringen Schrumpfung der für unbewässerten Anbau oder Viehzucht geeigneten Fläche ein Land seine Bevölkerung nicht mehr ernähren kann. Gebiete mit relativ geringem landwirtschaftlich nutzbaren Flächenanteil, die gleichzeitig nach Klimamodellrechnungen mit reduzierter Bodenfeuchte zu rechnen haben, sind (60):

Maghreb, West Afrika, Horn von Afrika, südliches Afrika, Westarabien, Teile Südasiens, Mexiko, Mittelamerika, Teile Ostbrasilien.

Aber auch die Regionen, welche Getreide exportieren können, müssen besonders betrachtet werden. Von den 21 Exporteuren für Getreide bei insgesamt 172 Ländern trugen 1987 nur drei, nämlich USA, Kanada und Frankreich, 77 Prozent des Weltgetreidehandels. Die Vorräte an Getreide (etwa 50 Prozent der mit der Nahrung aufgenommenen Energie stammt weltweit gemittelt vom Getreide) zeigen die Abhängigkeit von einzelnen Ländern und Klimata noch deutlicher. 1988/89 besaßen die USA, Kanada und die EG fast ein Drittel der Weltreserven an Weizen und anderen Getreidearten. Die Reserven sanken von 353 Millionen Tonnen 1987/88 auf 248 Millionen Tonnen 1988/89 (61) und blieben weiter so niedrig, überwiegend verursacht von der Dürre im Jahre 1988 in den Vereinigten Staaten von Amerika. Werden Teile der Überschußgebiete trockener, so wird weniger exportiert, mit schwerwiegenden Folgen für die importierenden Länder. Welche Überschußregionen betroffen sein werden, ist gegenwärtig nicht bekannt, weil speziell in den mittleren nördlichen Breiten die Aussagen der gekoppelten Ozean-Atmosphäre-Modelle sich wesentlich von den Gleichgewichtsrechnungen mit Zirkulationsmodellen der Atmosphäre (letztere waren Basis der IPCC-Aussagen) unterscheiden. Wegen der relativ starken Durchmischung der Ozeane bei etwa  $45\text{--}60^\circ\text{N}$  zeigen gekoppelte Modelle relativ geringe Temperaturänderungen für ozeannahe Gebiete und oft uneinheitliche Bodenfeuchteänderungen (62). Lediglich im größten Teil des Inneren Nordamerikas wird einheitlich von den Modellen reduzierte Bodenfeuchte berechnet.

### 3.3.2 Mögliche Auswirkungen der Spurengase und des Temperaturanstiegs

Die vom Spurengasanstieg verursachte Klimaänderung wird etwa zur Hälfte vom  $\text{CO}_2$  getragen. Daher sind es insbesondere drei ihrer Wirkungen die für die Landwirtschaft von besonderer Bedeutung sind:

- Effekt erhöhter  $\text{CO}_2$ -Konzentration auf die Netto-primärproduktion,
- Wirkung veränderter Klimaparameter auf Nutztiere und Nutzpflanzen,
- Folgen des erhöhten Meeresspiegels für die Landnutzung.

#### – Effekt erhöhten $\text{CO}_2$ -Gehaltes der Luft

Die meisten C3-Pflanzen (Weizen, Reis, Roggen, Rüben, Gemüse) enthalten bei  $2 \cdot \text{CO}_2$  im reifen Zustand

eine um 10 bis 50 Prozent höhere Trockenmasse, aber auch Verringerungen um 26 Prozent und Steigerungen um 200 Prozent kamen bei insgesamt 770 Untersuchungen vor (63). Die in gemäßigten Breiten vorkommenden Getreidesorten steigerten die Körnermasse um 36 Prozent. Auch einzelne Sorten der gleichen Art unterscheiden sich kräftig in ihrer Reaktion auf erhöhten CO<sub>2</sub>-Pegel (64). Der Nettoeffekt einer CO<sub>2</sub>-Zunahme ohne Klimaänderung ist bei C3-Nutzpflanzen positiv, sofern CO<sub>2</sub> der begrenzende Faktor ist, in festen Prozentsätzen aber nicht anzugeben.

Die Gruppe der C4-Pflanzen (Mais, Hirse und Zuckerrohr sind prominente Vertreter) dagegen zeigt, obwohl weniger untersucht, insgesamt schwächere Reaktion auf erhöhten CO<sub>2</sub>-Gehalt der Luft. Sie ist vor allem wegen des Mais wichtig, der 14 Prozent der weltweiten Getreideernte ausmacht. Seine Bedeutung steigt von mittleren Breiten zu den Tropen stark an. Zu beachten ist außerdem, daß 14 der 17 wichtigsten „Unkräuter“ C4-Pflanzen im C3-Pflanzen-Anbau sind (65). Aber auch unerwünschte C3-Pflanzen in Anbauflächen mit C4-Pflanzen könnten zu einem größeren Problem werden. Die relativen Unterschiede in der Reaktion auf CO<sub>2</sub>-Änderungen werden bestimmte Nutzpflanzen lokal oder weltweit zurückdrängen, zum Beispiel Mais gegenüber Sojabohnen, Zuckerrohr gegenüber Zuckerrüben.

Eine dritte Pflanzengruppe, die Krassulaceen oder Dickblattgewächse (Ananas und Sisal sind wichtige Nutzpflanzen aus dieser Gruppe), zeigen fast keine Reaktion auf veränderten CO<sub>2</sub>-Gehalt.

Erhöhter CO<sub>2</sub>-Gehalt führt vor allem bei C3-Pflanzen weiterhin zu:

- kürzerer oder längerer Zeitspanne bis zur Blüte bei einigen Pflanzen;
- niedrigerem Verhältnis von Stickstoff zu Kohlenstoff, also vermindertem Eiweißgehalt bei allen untersuchten Pflanzen;
- verändertem Freßverhalten von Schädlingen;
- abgeschwächtem Abbau organischen Materials im Boden wegen des erhöhten Verhältnisses von Kohlenstoff zu Stickstoff und Phosphor;
- verminderter Weite der Spaltöffnungen (40 Prozent geringer bei verdoppeltem CO<sub>2</sub>-Gehalt) an den Blättern, deren Nettoeffekt auf die Verdunstung und die Biomassenproduktion aber wegen der vielen Rückkopplungen mit erhöhter Blattfläche, veränderter Feuchte in der planetarischen Grenzschicht nicht einfach abgeschätzt werden kann;
- verstärkter Stickstofffixierung durch Knöllchenbakterien an den Leguminosen, solange keine Temperaturzunahme auftritt.

Die Zunahme der anderen anthropogenen Treibhausgase neben CO<sub>2</sub>, nämlich CH<sub>4</sub>, N<sub>2</sub>O und FCKW übt keinen direkten Einfluß auf Pflanzen und Tiere aus. Eine Ausnahme ist das bodennahe Ozon. Es behindert das Pflanzenwachstum und beeinträchtigt die Gesundheit von Haustieren. Obwohl das maximale am Arbeitsplatz erlaubte Mischungsverhältnis von 0,1 ppmv in sommerlichen Smogepisoden mehrfach und

oft über Tage hinweg überschritten wird, ist der typische Wert außerhalb von Ballungsgebieten mit 0,015 bis 0,03 ppmv noch eindeutig unter dieser Grenze. Versuche mit Luft ohne Ozon haben gezeigt, daß im Südosten der Vereinigten Staaten bei jetzt typischerweise 0,08 ppmv O<sub>3</sub> eine Ertragssteigerung um 10 bis 50 Prozent möglich wäre (66). Jede weitere Ozonzunahme in Bodennähe mindert den Ertrag. Somit bewirkt das bodennahe Ozon schon jetzt ein zum CO<sub>2</sub>-Einfluß gegenläufigen Effekt. Dies unterstreicht die Bedeutung der Emissionsminderung bei NO<sub>x</sub> und Kohlenwasserstoffen, den für die Ozonbildung in der Troposphäre verantwortlichen Vorläufergasen.

### – Änderung von Klimaparametern

Jede Temperaturzunahme in den feuchten nördlichen Regionen verschiebt die potentiellen Anbauzonen für Getreide nordwärts, weil die dafür notwendige Temperatursumme (meist das Produkt aus Tagen mit Temperaturen über einem Grenzwert von 5°C) ebenfalls nordwärts wandert. Eine Zunahme der Temperatur um 1°C verlagert die Nordgrenze des Ackerbaus, falls die Böden es zulassen, um etwa 150 bis 200 km nordwärts oder um 150 bis 200 Meter in der Höhe (67). Nach den Ergebnissen der Klimamodellrechnungen sollte vor allem im Inneren Asiens aber auch in Kanada eine starke Verlagerung möglich sein. Zu beachten ist allerdings, daß gleichzeitig die Erträge in den bisherigen Hauptanbauzonen selbst bei ausreichendem Wasserangebot zurückgehen könnten, weil bei höheren Temperaturen die Pflanzen rascher reifen und der Ertrag dabei sinken kann. Auch das Ausbleiben der für Wintergetreide und andere Nutzpflanzen notwendigen Winterkälte kann bei Erwärmung zu verminderten Erträgen führen; so ist die Kältesumme etwa bei 1°C Erwärmung um 10 bis 30 Prozent niedriger (68).

Jede Bodenfeuchteänderung verändert den Ertrag in der Landwirtschaft. Da jedoch Niederschlagsänderungen und Verdunstungsraten als Funktion des Boden- und Vegetationstyps Voraussetzung für Berechnungen der Bodenfeuchteänderung sind und alle diese Parameter sehr wenig verlässlich aus Klimamodellrechnungen folgen, ist eine einigermaßen sichere Aussage über besonders betroffene Regionen nicht möglich. Es möge genügen zu sagen, daß die Rechnungen der gekoppelten Ozean-Atmosphäre-Modelle keine generelle Niederschlagszunahme in ariden und semiariden Gebieten anzeigen, so daß bei auch dort erhöhter Temperatur diese schon jetzt an Wassermangel leidenden Gebiete keine Erhöhung der landwirtschaftlichen Erträge zu erwarten haben. In diesem Zusammenhang ist auch die Verteilung des Niederschlags innerhalb eines Jahres und die Schwankung von Jahr zu Jahr besonders bedeutend. Die Rechnungen mit gekoppelten Modellen sind bezüglich dieser Klimateigenschaften noch nicht untersucht worden.

Jede Klimaänderung bedeutet veränderte Extremwerte, und Pflanzen reagieren vor allem auf solche Extremwerte sehr stark. Wie häufig welche Gebiete von dadurch entstandenen Ernteeinbußen betroffen sein könnten, ist nicht untersucht. Folge einer Erwärmung



mung der Erde ist in fast allen Gebieten eine Erhöhung der Variabilität des Niederschlages, so daß vor allem tropische und subtropische Regionen sogar bei gleichem oder leicht erhöhtem Niederschlag häufigere Dürren erleben sollten (69). Das könnte eine der stärksten Wirkungen einer Klimaänderung sein (70).

#### – **Veränderte Schädlingshäufigkeit und Ausdehnung von Krankheiten**

Das Verbreitungsgebiet vieler Schädlinge und der Krankheitserreger bei Nutzpflanzen und Tieren in der Landwirtschaft wird auch durch die Temperatur bestimmt. Bei Temperaturzunahme würden es sich polwärts ausdehnen. Nach Aussagen der Umweltbehörde der USA (71) könnten gegenwärtig auf die Tropen beschränkte Krankheiten wie das Afrikanische Schweinefieber in die Vereinigten Staaten gelangen und schweren ökonomischen Schaden anrichten. Als ein Beispiel für eine Ausbreitung nach Norden wird die bei außergewöhnlicher Wärme 1986 bis 1988 beobachtete, eine Heuschreckeninvasion in Südeuropa gesehen, die in diesem Jahr eine neue nördliche Extremposition erreichte (72). In den Gebieten, in denen Schädlinge und Krankheitserreger schon heute vorkommen, erreichen diese oft größere Wirkung, wenn die Temperatur zunimmt.

#### – **Meeresspiegelanstieg**

Viele besonders fruchtbare Deltaregionen und Marschniederungen gehen bei einem Meeresspiegelanstieg verloren, wenn die Sedimentation nicht mithalten kann. Bislang hat allerdings die Sedimentation in vielen ungeschützten Deltaregionen Schritt gehalten mit dem Meeresspiegelanstieg. In Gebieten mit Deichen an Küsten und Flüssen ist dieser natürliche Zuwachs unterbunden und die Schutzmaßnahmen müssen daher kontinuierlich steigen. Zum beobachteten Meeresspiegelanstieg von etwa 15 cm in den vergangenen 100 Jahren wird mit sehr hoher Wahrscheinlichkeit ein weiterer, beschleunigter hinzukommen, so daß es mehr ungeschützte Gebiete geben wird, wo die Sedimentation nicht mehr Schritt hält und verheerende Überschwemmungen bei Stürmen auftreten werden. Bei der Suche nach den gefährdeten Regionen wird die geringe Kenntnis über unsere Umwelt offenbar. Es ist zum Beispiel nicht möglich anzugeben, wieviele Menschen in Indonesien in Gebieten leben, die niedriger als einen halben Meter über dem Meeresspiegel liegen. Nach einer groben Schätzung des Umweltprogrammes der Vereinten Nationen (73) würden über 50 Millionen Menschen bei einem Meeresspiegelanstieg um 1,5 Meter ihre Heimat verlieren. Die am stärksten gefährdeten Länder, gemessen an der Zahl der Betroffenen, sind nach Aussagen von Experten Bangladesch, Ägypten, Thailand, China, Brasilien, Indonesien und Argentinien, aber auch viele andere Deltaregionen, zum Beispiel in Afrika neben dem Nildelta solche in den Ländern Gambia, Senegal, Nigeria und Mozambik, wären stark betroffen.

Weiterhin sind viele landwirtschaftlich intensiv genutzte Regionen in Industrieländern gefährdet: Kü-

sten in der gesamten südlichen Nordsee, an der Pommündung, in Louisiana, im sowjetischen Teil des finnischen Meerbusen und anderen Regionen. Oft sind das auch Gebiete, die tektonisch absinken. In Louisiana beispielsweise gehen jährlich 250 km<sup>2</sup> Land verloren, weil das Gebiet etwa einen Zentimeter pro Jahr absinkt (74).

Bei einem Anstieg des Meeresspiegels um einen Meter verlieren zum Beispiel Bangladesch und Ägypten über 10 Prozent ihrer Anbaufläche und weitere Gebiete sind geschädigt. In beiden Ländern ist das Geld für wirksame Schutzmaßnahmen nicht vorhanden. Da diese Länder den zusätzlichen Treibhauseffekt nur in sehr geringem Maße mitverursacht haben, bedeutet dies gleichzeitig, daß sich ein neuer Konflikt zwischen Industrie- und Entwicklungsländern aufbauen könnte.

Über den Verlust von Anbaugebieten durch Überschwemmung hinaus betrifft ein höherer Meeresspiegel die Landwirtschaft noch mehrfach:

- Deichbaukosten an Küsten und Flüssen zum Schutz von Anbauflächen konkurrieren mit solchen für Städte,
- Salzwasser dringt in die Bewässerungssysteme vor,
- Überschwemmungsbedrohte Gebiete werden vernachlässigt oder aufgegeben.

#### – **Indirekte Wirkungen**

Die Überschußlandwirtschaft in einigen Industrieländern, aber auch die minimale Ernährungssicherung in beispielsweise bevölkerungsreichen Entwicklungsländern wie China und Indien beruhen schon heute zu einem wesentlichen Teil auf der Bewässerung. Seit 1900 ist die bewässerte Fläche von 40 Millionen Hektar über 94 im Jahre 1950 auf 249 im Jahre 1980 und heute 257 Millionen Hektar angestiegen (75). Eine Klimaänderung wird die Grundlage der Bewässerung, nämlich das Grundwasser als einem Restglied des Wasserkreislaufs, sehr stark beeinflussen. Schon jetzt werden in den Vereinigten Staaten von Amerika wegen erschöpfter Grundwasserreserven Millionen Hektar Ackerflächen stillgelegt (76). Trifft die Aussage der Klimamodelle zu, daß sich die reduzierte Bodenfeuchte im Inneren von Kontinenten verringert, so ist ein Teil der Überschußproduktion durch Bewässerung gefährdet oder nicht mehr möglich.

Auch die Winderosion würde in Gebieten mit erhöhter Dürrehäufigkeit zunehmen, genauso wie die tropischen Böden bei Niederschlagszunahme noch mehr Nährstoffe durch Ausschwemmung verlieren. Genauo könnte aber in erosionsgefährdeten semiariden Gebieten bei erhöhter Grundwasserbildung und damit dichter Vegetation Erosion vermindert werden.

Angaben über Zunahme oder Einbußen bei Ernteträgen in einzelnen Regionen unter dem Einfluß von Erwärmung und Niederschlagsänderungen können kaum gemacht werden, da schon die Eingabeparameter zu unsicher sind, um darauf die politischen Entscheidungen der nahen Zukunft zu gründen. Fol-

gende Fakten (77) zur Entwicklung der Welternährungssituation der vergangenen Jahre mögen genügen, um deutlich zu machen, daß die Reduktion der Treibhausgasemission ein wichtiger Beitrag zur Sicherung der Ernährung ist:

- Die Pro-Kopf-Erzeugung an Getreide sinkt seit 1984, nachdem sie von 1950 bis 1984 um 40 Prozent angestiegen war.
- Die Getreideanbaufläche stieg von 1950 bis 1981 um 24 Prozent; seitdem ist sie um 7 Prozent zurückgegangen.
- Die Getreideerträge pro Hektar stiegen von 1100 kg im Jahre 1950 auf etwa 2300 im Jahre 1986 und sind seitdem wegen der Dürren in China (und Indien) sowie den USA leicht zurückgegangen.
- Der Düngemiteleinsatz pro Kopf stieg von 1950 bis 1980 von 5 auf 26 kg; der Anstieg hat sich danach wesentlich verlangsamt.
- Die Anbaufläche pro Kopf schrumpfte von 0,23 Hektar im Jahre 1950 auf 0,12 Hektar im Jahre 1988.

### 3.3.3 Mögliche Auswirkungen auf Wirtschaft und Gesellschaft

Ein Rückgang oder ein Aufgeben der Landwirtschaft in einigen Regionen als Folge einer Klimaänderung würde Auswirkungen auf die wirtschaftliche Situation eines Landes, seine Gesellschaft und den internationalen Handel haben. Wenn es jedoch kaum möglich ist, die klimabedingten Ernteänderungen für eine Region abzuschätzen, dann sind Angaben über die Kosten einer Umstellung der Landwirtschaft und die möglichen Reaktionen der Gesellschaft -also Voraussetzung für Entscheidungen – noch weniger möglich. Lediglich Fallstudien unter Nutzung der Wetterempfindlichkeit von Teilsystemen sind möglich. Zwei davon sollen hier aufgeführt werden.

Die Umweltbehörde der Vereinigten Staaten (78) schätzt, daß die Bewässerungskosten bei einer Erwärmung, entsprechend einer Verdoppelung des CO<sub>2</sub>-Gehalts in der Atmosphäre, im südlichen Teil der Prärien um 20 bis 25 Prozent steigen würden. Im Gebiet um Moskau würde eine Temperaturänderung von nur 1°C die Kosten für Winterweizen um 22 Prozent reduzieren, aber die für Roggen, Hafer und Kartoffeln erhöhen. Es gibt viele ähnliche Beispiele aus den hochentwickelten Ländern, aber alle gehen von fest vorgegebenen Klimaänderungen und Preisen für Energie und Dünger aus. Die Preise werden bei Maßnahmen gegen den zusätzlichen Treibhauseffekt wahrscheinlich beträchtlich steigen. Es ist an der Zeit, daß weiterführende Studien (vor allem auch für Entwicklungsländer) begonnen werden, die mindestens von einigen der folgenden Voraussetzungen ausgehen sollten:

1. Zeitabhängigen Klimaänderungen aus Rechnungen mit gekoppelten Ozean-Atmosphäre-Modellen für Szenarien mit und ohne Eindämmung des Treibhauseffektes;

2. zeitabhängigen Energie-, Düngemittel- und Saatgutpreisen;
3. zeitabhängigem Verhältnis zwischen Brot- und Futtergetreide also auch Szenarien des Fleischkonsums;
4. zeitabhängigem Verlauf des CO<sub>2</sub>-Düngeeffektes für Nutzpflanzen; der unfreiwilligen Stickstoffdüngung aus der Luft und der Ertragseinbußen durch bodennahe Ozon;
5. veränderten Weltmarktpreisen für Getreide;
6. jeweils angepaßten oder stagnierenden Agrarstrukturen und schließlich
7. veränderter Agrarpolitik der großen Erzeugergemeinschaften.

### 3.4 Forstwirtschaft

Wälder bedecken ein knappes Drittel der Landoberfläche. Etwa die Hälfte der Wälder wird forstwirtschaftlich genutzt, wobei dieser Anteil in den meisten Industrieländern erheblich darüber und in vielen Tropenwaldländern darunter liegt.

Da eine globale Übersicht über die jeweils praktizierte Form der Forstwirtschaft fehlt und auch innerhalb eines bewirtschafteten Waldes verschiedene Formen des Waldbaus nebeneinander vorkommen, ist es nicht möglich, die Reaktion aller bewirtschafteten Wälder auf eine Klimaänderung genau zu beschreiben. Daher

Tabelle 4

#### Waldflächenanteil verschiedener Regionen (80)

Region	Anteil an Landfläche in %	Anteil an gesamter Waldfläche in %
<b>Industrielländer</b> . . . . .	33,3	44,7
Nordamerika . . . . .	33,3	14,8
Westeuropa . . . . .	33,8	3,1
Osteuropa . . . . .	29,0	0,7
UdSSR . . . . .	41,3	22,5
Japan . . . . .	67,6	0,6
andere <sup>1)</sup> . . . . .	12,9	2,9
<b>Entwicklungsländer</b> . . . . .	29,8	55,3
Afrika . . . . .	27,5	15,7
Naher Osten . . . . .	8,2	2,4
China . . . . .	12,5	2,8
übriges Asien/Pazifische Region . . . . .	34,6	8,7
Lateinamerika . . . . .	50,2	24,8
andere <sup>2)</sup> . . . . .	42,2	0,9
Welt . . . . .	31,3	100,0

1) Australien, Israel, Neuseeland, Südafrika

2) Pazifische Inseln

ist eine Konzentration auf wenige Beispiele in Gebieten mit starken möglichen Klimaänderungen angezeigt. Der mögliche CO<sub>2</sub>-Düngeeffekt kann nicht beurteilt werden, da die bislang vorliegenden Untersuchungen nur unter Laborbedingungen und an wenigen Arten durchgeführt wurden (79).

– **Waldflächen und Holznutzung**

Die Landoberflächen waren 1980 zu 31 Prozent mit geschlossenem Wald bedeckt, wobei sehr starke Unterschiede sowohl innerhalb der Industrieländer als auch der Entwicklungsländer auftraten (Tabelle 4). Besonders walddreiche Industrieländer sind die Sowjetunion und Japan, besonders waldarme Australien, Neuseeland, Israel und Südafrika mit nur insgesamt 13 Prozent bewaldeter Fläche. Tabelle 5 listet die Verteilung des Holzaufkommens nach Nutzholz (Rundholz, Papierholz) und Brennholz auf. Während der überwiegende Teil des Holzaufkommens in den Entwicklungsländern als Brennholz genutzt wird, überwiegt in Industrieländern die Verwendung zu Nutzholzzwecken. Dabei muß berücksichtigt werden, daß gerade Brennholz nicht nur aus dem Holzeinschlag in Wäldern stammt, sondern daß hier auch Abfallholz, Totholz und Holz aus Buschland und anderem Verwendung findet.

– **Verschiebung der Waldvegetationszonen**

Voraussagen über eine Verschiebung der Vegetationszonen hängen vor allem von der Güte der benutzten Klimamodelle ab. Da diese – wie auch bei allen anderen Wirkungen in der bisher umfassendsten Zusammenstellung des Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) – vom sogenannten 2 \* CO<sub>2</sub> Gleichgewichtsklima in etwa 100 Jahren ausgeht, aber inzwischen erste zeitabhängige Rechnungen mit gekoppelten Atmosphäre-Ozean-Modellen mit prinzipiell verlässlicheren Aussagen existieren, muß überprüft werden, ob die IPCC-Aussagen übernommen werden können. Das bisher wahrscheinlichste Szenario mit dem Namen „Business as usual“ (BAU), das gegenwärtige Trends in den Emissionsraten ohne Eingriffe extrapoliert, errechnet den verdoppelten äquivalenten CO<sub>2</sub>-Gehalt etwa für das Jahr 2025, also viel rascher als in 100 Jahren, wie im Abschnitt für die Forstwirtschaft von der Arbeitsgruppe 2 des IPCC angenommen. Angesichts einer durch den Ozean um mindestens drei Jahrzehnte stark verzögerten Reaktion auf den Anstoß „Spurengaszunahme“ ist die obige Annahme „2 \* CO<sub>2</sub>-Gleichgewichtsklima“ als annähernd realistisch für die Temperaturerhöhung in etwa 100 Jahren zu bezeichnen, wenn nur gezeigt werden soll, was ohne Maßnahmen passieren würde. Teile der Aussagen werden daher hier übernommen.

Tabelle 5

**Holzaufkommen in wichtigen Gebieten, unterteilt in Rundholz, Papierholz und Brennholz sowie in Nadelholz und andere Hölzer für die beiden ersten Nutzungsarten (81)**

Region	Rundholz				Papierholz				Brennholz	
	Nadelholz		andere Hölzer		Nadelholz		andere Hölzer			
Westkanada . . . . .	69,9 <sup>1)</sup>	10,9 <sup>2)</sup>	3,4	1,2	31,7	8,2	7,4	5,1		
Ostkanada . . . . .	37,5	6,2		<sup>3)</sup>	36,0	9,3	9,5	6,6		
Westliche USA . . . . .	88,3	14,6			39,8	10,3	25,0	1,1	16,2	1,2
Östliche USA . . . . .	64,7	10,7	39,2	13,8	95,1	24,6	39,4	27,3	18,9	1,4
Brasilien . . . . .	8,7	1,6	23,3	8,2	6,2	1,6	10,1	7,0	40,5	3,5
Chile . . . . .					4,6	1,2				
Übriges Lateinamerika			13,9	4,9	6,6	1,7	2,0	1,4	78,4	5,8
Finnland . . . . .	21,2	3,5			22,0	5,7	5,5	3,8		
Schweden . . . . .	22,4	3,7			25,9	6,7	4,9	3,4		
Westeuropa . . . . .	47,8	7,9	20,2	7,1	36,7	9,5	22,1	15,3	27,4	2,0
UdSSR . . . . .	131,8	21,8	19,9	7,0	32,1	7,0	7,9	5,5	78,4	5,8
Osteuropa . . . . .	33,3	5,5	21,9	7,7	18,9	4,9	7,9	5,5		
Afrika . . . . .			16,5	5,8					382,3	29,3
China . . . . .	22,4	3,7	13,9	4,9	8,1	2,1	3,3	2,3	160,8	11,9
Japan . . . . .	17,5	2,9	4,8	1,7	4,3	1,1	16,9	11,7		
SO-Asien . . . . .			63,9	22,5					174,3	12,9
Australien/Neuseeland	7,3	1,2	6,5	2,3	9,7	2,5	2,3	1,6		
andere . . . . .	20,6	3,4	31,0	10,9			1,7	1,2	356,6	26,4
<b>Summe . . . . .</b>	<b>604,7</b>		<b>284,2</b>		<b>386,7</b>		<b>144,3</b>		<b>1 350,9</b>	

1) jeweils erste Spalte: Angaben in Millionen Kubikmeter  
 2) jeweils zweite Spalte: Angaben in Prozent der weltweiten Nutzung  
 3) freigelassene Stellen entsprechen Anteilen unter ein Prozent

Danach würden die borealen Wälder in das Gebiet der Tundra, zum Teil an das Polarmeer vordringen und insgesamt schrumpfen. Die Verschiebung betrüge Hunderte von Kilometern im Mittel. Berücksichtigt man die Differenzen in der Erwärmung zwischen verschiedenen Klimamodellen, wie es für Kanada schon gemacht wurde, dann würde sich die Verschiebung des Südrandes der borealen Wälder um 470 bis 920 km und die Verschiebung des Nordrandes um 80 bis 720 km auf 250 bis 900 km beziehungsweise 100 bis 730 km ändern (82). Dabei würden in letzterem Fall noch immer 100 Millionen Hektar Waldgebiet verloren gehen, wenn es dem Wald nicht gelingen würde so rasch nordwärts zu wandern (83). Wegen der nicht bekannten Niederschlagsänderungen in Teilregionen des tropischen und subtropischen Bereichs ist eine Aussage über wahrscheinliche Verschiebungen der dortigen Waldzonen nicht sinnvoll.

Die Geschwindigkeit der Verlagerung der Vegetationszonen einzelner Baumarten bei verändertem Klima ist bei den meist langsamen natürlichen Veränderungen fast ausschließlich von der Änderungsrate der Temperatur und des Niederschlags bestimmt. Ist sie, wie für das nächste Jahrhundert prognostiziert, sehr hoch, dann hemmt für viele Baumarten schon die zu geringe Verbreitungsgeschwindigkeit der Samen die Wanderung. Reicht diese aus, dann werden die neu erreichten und noch kaum veränderten Böden oft ungeeignet sein. Darüber hinaus gibt es heute in vielen Gebieten wegen veränderter Landnutzung durch den Menschen inselartige Wälder, denen die Ausbreitung so verwehrt ist. Bei Erwärmung wird die Fläche gesunder Wälder auch ohne Luftverschmutzung stark schrumpfen (84).

Es gibt ein paläoklimatisches Ereignis, die sogenannte jüngere Dryas-Periode um etwa 11 000 Jahre vor heute im Übergang aus der letzten intensiven Vereisung in die heutige Warmzeit, wo für einige Jahrhunderte ein rascher Rückfall in kaltes Klima im nordatlantischen Bereich folgte. Pollenanalysen (85), das Verhältnis der Sauerstoffisotope in Sedimenten von Seen und im Grönlandeis sowie der CO<sub>2</sub>-Gehalt in Luftbläschen in diesem Eis deuten alle auf dieses Ereignis hin (86). Der Anlaß war sehr wahrscheinlich starker Schmelzwasserzufluß aus dem Sankt-Lorenz-Strom in Kanada in den Nordatlantik, der die Tiefenwasserbildung an der Meereiskante stoppte und wegen dadurch verminderten meridionalen Wärmetransports vorübergehend zu einer rapiden Abkühlung in Teilen Nordamerikas und Europas führte. Die Pollenanalysen zeigen, daß die Wanderungsgeschwindigkeit vieler Baumarten weit geringer war, als es der Temperaturänderung entsprochen hätte.

#### – Veränderung der Biomasse im Waldbestand

Nach einer numerischen Simulation für die nördlichen mittleren Breiten, die bei Vorgabe der 2 \* CO<sub>2</sub>-Gleichgewichtsklimaänderungen in einem biologischen Modell in den meisten Gebieten einen Rückgang der Biomasse des Waldes ergab, wurde die ursprüngliche Biomasse in den Laubwaldgebieten nur teilweise wieder erreicht, im südlichen Übergangsbereich von Laub- zu Nadelbäumen dagegen durch verstärkten Laub-

holzzuwachs durchwegs. Im nördlichen Teil des Übergangsbereichs trat aber zweimal ein Biomasseschwund auf, als Nadelhölzer zunächst durch andere Nadelhölzer und danach durch Laubhölzer ersetzt wurden (87). In der reinen Nadelwaldzone selbst trat ebenfalls ein Biomasseschwund auf, und vor allem im Norden dauerte der Einzug von Laubhölzern lange. 300 Jahre nach der vorgegebenen 2 \* CO<sub>2</sub> Erwärmung waren Baumarten und Biomassedichte noch immer nicht völlig angepaßt.

Neben diesen in hohen nördlichen Breiten meist von der Temperaturänderung diktierten Veränderungen der Zusammensetzung eines Waldes gibt es einige weitere Folgen einer Klimaänderung für einen Wald. Ein unter physikalischem Streß stehender Baum wird eher erkranken, Waldbrände werden größere Flächen vernichten, vor allem bei zurückgehender Bodenfeuchte und nicht mehr angepaßter Artenzusammensetzung. Der Aufwuchs noch schlechter als bisher angepaßter Anpflanzungen wird schwieriger, aber bei günstigen Feuchtebedingungen und höherer Temperatur könnte auch der Jahreszuwachs zunehmen, vor allem wenn gleichzeitig erhöhter CO<sub>2</sub>-Gehalt der Luft Wachstum prinzipiell fördert. Wo genau welcher Effekt eintreten wird, bleibt beim gegenwärtigen Stand der Kenntnis ungewiß. Dennoch können zwei besonders gefährdete Waldregionen identifiziert werden:

- Die auch natürlicherweise meist gleichaltrigen borealen Waldbestände, die besonders starken Temperaturänderungen unterliegen und daher besonders rasch nicht mehr angepaßt sind sowie
- Wälder semiarider Gebiete, wo bei steigender Temperatur und nicht gleichzeitig für gleiche Bodenfeuchtebedingungen ausreichend zunehmendem Niederschlag die Existenz eines Waldes generell gefährdet ist.

#### – Wirtschaftliche Folgen

Rasche Klimaänderungen werden auch wirtschaftliche Folgen für die Forstwirtschaft haben. Zum einen könnten die durch Schadstoffbelastung verursachten neuartigen Waldschäden unter dem zusätzlichen Streß veränderter Temperatur- und Niederschlagsbedingungen weiter verstärkt werden. Zum anderen könnten verstärkte Investitionen notwendig sein, um die Waldbausysteme zum Beispiel hinsichtlich der Baumartenwahl oder Umtriebszeit veränderten Klimabedingungen anzupassen.

### 3.5 Hydrologie und Wasserwirtschaft

Bei Klimaänderungen wird Wasser umverteilt und wirkt selbst als die für das Klima wichtigste Substanz auf dieses zurück. So bestehen die hellste (Pulverschnee) und die dunkelste (Ozean) natürliche Oberfläche aus fast reinem Wasser; die Rückstreuungsfähigkeit des Planeten wird von Tröpfchen und Kristallen in Wolken beherrscht.

Vorhersagen zu hydrologischen Veränderungen bei Klimaänderung und deren Folgen für die Wasserwirt-

schaft sind noch schwieriger als die Vorhersage von Temperatur- und Niederschlagsänderungen bei erhöhtem Treibhauseffekt. Daher muß sich dieser Abschnitt eher auf eine Aufzählung der möglichen Folgen für hydrologische Teilaspekte als eine Angabe bestimmter regionaler Änderungen der Hydrologie beschränken. Zur Abschätzung der Folgen wird erstens von einem Spurengasanstieg auszugehen sein, der ohne emissionsmindernde Maßnahmen einträte und der sich dabei auf Klimamodellergebnisse stützt oder aber hypothetische Niederschlagsänderungen vorgibt. Es können zweitens auch extreme Abschnitte aus der jüngsten Vergangenheit als Beispiele für bevorstehende Änderungen herangezogen werden. Trotz dieser methodischen Schwächen zeigt die durch die Unkenntnis der Details erzwungene Vereinfachung doch, wie empfindlich wichtige Komponenten des Wasserkreislaufes, zum Beispiel der Abfluß eines großen Stromes in der trockenen Jahreszeit, auf kleine Temperatur- und Niederschlagsänderungen im Einzugsgebiet reagieren. Nach Angaben des IPCC ist in semiariden Gebieten bei einer Temperaturänderung von 1 bis 2°C und 10 Prozent Niederschlagsabnahme mit einer Abflußminderung von 40 bis 70 Prozent zu rechnen. Der von einigen Wissenschaftlern favorisierte Weg der Übernahme paläoklimatischer Analogien aus weit zurückliegenden Zeiten mit höherer Temperatur kann auf zweierlei Art irreführend sein: Erstens änderte sich damals das Klima um mindestens eine Größenordnung langsamer als für das nächste Jahrhundert vorherberechnet; das erwartete Klima ist damit weit vom üblichen Anpassungsgrad entfernt. Zweitens war während dieser Warmzeiten die geographische Verteilung der Bestrahlung durch die Sonne wegen der in Jahrtausenden doch systematisch veränderten Bahn der Erde um die Sonne meist verschieden von der heutigen Verteilung.

### 3.5.1 Empfindlichkeit des Abflusses gegenüber Klimaänderungen

Je trockener eine Region ist, um so empfindlicher reagiert sie auf Niederschlagsänderungen. In Trockengebieten variiert nicht nur der Abfluß von Jahr zu Jahr schon jetzt sehr stark, sondern er kann auch innerhalb des Jahres bei Klimaänderung stark umverteilt werden, besonders wenn Teile des Abflusses durch Schneeschmelze zustande kommen. Denn dann sind die Abflußraten auch stark von Temperaturänderungen und nicht nur von Niederschlagsänderungen abhängig. Vielerorts werden bei Erwärmung von nur 1 bis 2°C die Winterhochwasser zunehmen und dafür die Frühjahrshochwasser abnehmen. Die Schifffahrt hängt auf vielen Flüssen, zum Beispiel dem Rhein, in trockenen Sommern stark vom Schmelzwasser aus Hochgebirgen ab. Ließe diese Wasserspende in trockenen Abschnitten nach, etwa weil viele Gletscher verschwunden sind, ist die Schifffahrt gefährdet. In Regionen mit (ganzjährig) hoher Temperatur und ausreichend Niederschlag ist der von Pflanzen verdunstete Teil des Niederschlags eine wesentliche Komponente (bis zu 75 Prozent im tropischen Regenwald) des Wasserhaushaltes. Reaktionen der Pflanzendecke auf Klimaänderungen und auf erhöhten CO<sub>2</sub>-Gehalt der Luft könnten so das Abflußsystem drastisch verändern.

Besonders wichtig für die Wasserwirtschaft sind die Extrema des Abflusses und der maximale Verbrauch. Veränderungen der Extrema bei erhöhtem Treibhauseffekt und gleichzeitig erhöhter Wasserbedarf sind die Probleme für die zukünftige Wasserwirtschaft. Während bisher die Grundvoraussetzung für die Auslegung von Staudämmen, Bewässerungssystemen, Schifffahrtsstraßen und Hochwasserschutzanlagen die Stabilität der hydrometeorologischen Randbedingung war, denn nur solche Stabilität erlaubt überhaupt die Definition des Jahrhunderthochwassers, so müßte jetzt auf jeden Fall in jede Planung veränderliches Klima einbezogen werden. Dies ist wegen noch fehlender verlässlicher Regionalisierung der Temperatur- und Niederschlagsänderungen leider nicht möglich, so daß wasserwirtschaftliche Planungen in einem Dilemma stecken und außer der Aufforderung zu noch sicherheitsbewußterer Auslegung von Anlagen oft kein weiterer Ratschlag gegeben werden kann. Sicherere Anlage sind also an fast allen Orten notwendig. Diese Forderung wird gestützt von Modellaussagen über die generelle Zunahme der Abschnitte besonders starker Niederschlagstätigkeit, aber auch der Verlängerung der niederschlagslosen Abschnitte bei erhöhtem Treibhauseffekt; beides wird verursacht durch die Zunahme des Anteiles konvektiver Niederschläge, also der Schauer und Gewitter (88). Die Empfindlichkeit des jeweiligen Einzugsgebietes kann jedoch aus Beobachtungen der hydrologischen Extremereignisse in der Vergangenheit erschlossen werden, wenn die zugehörigen meteorologischen Daten bekannt sind.

### 3.5.2 Veränderter Wasserbedarf

Mit dem Klima ändert sich auch der Wasserbedarf einer Region. Leidet eine Region schon jetzt wegen starken Verbrauchsanstieges unter Wassermangel wie zum Beispiel Kalifornien oder große Teile Südeuropas, dann wird jede zusätzliche Trockenheit auch die Konflikte zwischen Nutzergruppen in einem oder mehreren Ländern verschärfen. Kennt man den Wasserbedarf pro Kopf für unterschiedlich trockene Regionen und die Temperatur- sowie die Niederschlagsänderungen, so kann der zukünftige Bedarf abgeschätzt werden.

Gibt es für größere, wirtschaftlich ähnlich entwickelte Regionen einen annähernd linearen, empirischen Zusammenhang zwischen einem Trockenheitsindex (Verhältnis aus Strahlungsbilanz an der Oberfläche und der Energie, die zur völligen Verdunstung des Niederschlags gebraucht würde) und dem Pro-Kopf-Bedarf (89). Wäre zusätzlich die regionale Änderung dieser Klimaparameter bekannt, wäre die Bedarfsänderung leicht zu berechnen. Für die Änderung des Trockenheitsindex für Teile der Vereinigten Staaten von Amerika ist das getan worden (90), noch nicht aber für den veränderten Wasserverbrauch, der in diesem Gebiet besonders von den zukünftigen Bewässerungspraktiken abhängt; denn in vielen semiariden Gebieten wird der überwiegende Teil des vom Menschen genutzten Wassers (oft 80 Prozent) zur Bewässerung eingesetzt. So könnten bei 3°C Temperaturzunahme und 10 Prozent Niederschlagsabnahme in den bewässerten Regionen des Westens und Südwestens

der Vereinigten Staaten von Amerika 30 Prozent der bewässerten Kulturen wegen Wassermangels verloren gehen, und neue, sehr aufwendige Versorgungssysteme müßten aufgebaut werden (91).

### 3.5.3 Wasserhaushalt der Seen

Große Seen, vor allem diejenigen ohne Abfluß, wie das Kaspische Meer, sind besonders empfindliche Indikatoren eines veränderten Klimas, denn alle ihre Haushaltskomponenten wie Niederschlag, Verdunstung, Zu- und Abfluß reagieren darauf. Wegen ihrer großen wirtschaftlichen Bedeutung sind relativ detaillierte Untersuchungen über den Wasserhaushalt der großen Seen Nordamerikas und des Kaspischen Meeres bei Klimaänderungen vorhanden.

An den großen Seen in Nordamerika, die eine Fläche von der Größe der Bundesrepublik Deutschland haben und in deren Einzugsgebiet 37 Millionen Menschen wohnen, läßt sich der Wettstreit verschiedener Nutzungskategorien besonders gut aufzeigen. Für Stromerzeugung und Schifffahrt sind hohe Wasserstände erwünscht, für Erholung, Schutz der Häuser von Anliegern und der Küste niedrige. Übernimmt man die Klimaänderung bei verdoppeltem CO<sub>2</sub>-Gehalt aus drei Klimamodellen und schätzt die möglichen Änderungen des Wasserhaushaltes ab, so findet man je nach Modell einen stark – um etwa ein Viertel bis zur Hälfte – reduzierten Zufluß in die Seen, obwohl eines der Modelle sogar eine Niederschlagszunahme von 0,6 mm pro Tag zeigte. Die erhöhte Verdunstung bei höherer Temperatur hat also den Zuwachs an Niederschlag mehr als nur kompensiert. Auf den Pegel des Erie-Sees übertragen, der bei allen drei Klimaänderungsszenarien am stärksten betroffen ist, würde das einen Rückgang um bis zu einem Meter bedeuten mit vielerlei auch wirtschaftlichen Konsequenzen, wie zum Beispiel verschlechterter Wasserqualität, geringerer Stromerzeugung und Behinderung der Schifffahrt (92).

Das Kaspische Meer hat in jüngster Vergangenheit drastische Wasserstandsschwankungen gezeigt. Seit Beginn der Beobachtungen im Jahr 1837 blieb zunächst der Pegel etwa ein Jahrhundert lang zwischen 25,5 und 26,5 Meter unter NN, seit 1932 jedoch sank er bis 1977 auf 29,1 Meter unter NN, um danach bis 1989 wieder auf 27,7 Meter unter NN anzusteigen. Extrapoliert man Eingriffe in den Abfluß der Wolga aufgrund schon bestehender Planungen und beachtet Modellvorhersagen sowie Analogien aus der Klimageschichte, so sollte nach einem vorübergehenden Abfall der bei Erwärmung zunehmende Niederschlag im Wolgagebiet den Pegel ab etwa 2010 wieder ansteigen lassen.

### 3.5.4 Besonders gefährdete Regionen

Die Gefährdung der Lebensgrundlage der Menschen in großen Regionen bei systematisch vermindertem Niederschlag ist durch die große Sahel-Dürre jedem bekannt geworden. Die außergewöhnliche Dürre von 1970 bis 1985 mit nur etwa 60 Prozent des vorher typischen Niederschlags (93) an 60 Stationen im Sahel hat

die Wasserführung der Flüsse stark vermindert. Aus Vergleichen des Abflusses und des Niederschlags in den jeweils fünf nassesten und trockensten Jahren aus der jüngeren Vergangenheit ist auch für die Flüsse Senegal, Niger und Shary in dieser Region die überproportionale Reaktion des Abflusses bestätigt worden. Schrumpft der Niederschlag um 9 bis 24 Prozent, so nahm der Abfluß um 15 bis 59 Prozent ab, nahm der Niederschlag um 20 bis 30 Prozent zu, so stieg der Abfluß um 30 bis 50 Prozent (94). Der Tschad-See ist 1985 auf 2 000 km<sup>2</sup> beschränkt gewesen, weniger als ein Zehntel seiner Ausdehnung Anfang der sechziger Jahre. Sicherere Klimamodellaussagen wären für eine so gefährdete Region wie den Sahel extrem wichtig. Die gegenwärtigen sind jedoch noch zu ungenau, so daß eine ernstzunehmende Trendaussage nicht gelingt.

Eine weitere gefährdete Region ist das intensiv landwirtschaftlich genutzte Gebiet der Prärien im mittleren Teil der Vereinigten Staaten von Amerika. Teilweise bewässert, gehört es zu den Gebieten mit sehr hohem Wasserbedarf. Im Gebiet des South Platte, eines Flusses mit 62 000 km<sup>2</sup> Einzugsgebiet vornehmlich im US-Bundesstaat Colorado, benötigt umgerechnet jeder der 2,3 Millionen Einwohner täglich knapp 7 m<sup>3</sup> Wasser, das überwiegend zur Bewässerung verwendet wird. Bei Annahme der Klimaänderung, wie sie Gleichgewichtsrechnungen mit einer Verdoppelung des CO<sub>2</sub>-Gehaltes der Atmosphäre vorhersagen, wird in diesem Gebiet nach drei Modellen der Ertrag bei weizen und Mais nachlassen, selbst wenn eine mögliche erhöhte Photosyntheseleistung der Pflanzen bei höherem CO<sub>2</sub>-Gehalt mit einbezieht (95). Unbewässerter Getreideanbau würde zunehmend risikoreicher und Bewässerung wegen weiträumigen Transports teurer oder gar unmöglich. Die Folgen für den einzelnen Farmer wären ähnlich wie in der Dürrezeit der dreißiger Jahre.

Auch andere semiaride oder schwach humide Gebiete, zum Beispiel im Bereich des Mittelmeerklimagürtels, könnten wegen noch größeren Wassermangels ähnlich betroffen sein. Im Policymakers Summary der Arbeitsgruppe „Wirkungen von Klimaänderungen“ des IPCC werden unter anderem aufgeführt: Maghreb, Südafrika, südwestliche Vereinigte Staaten, Mittelmeerraum (96). Da diese Aussagen sich auf die Nordwärtsverschiebung der Sommerdürre in Gleichgewichtsmodellrechnungen stützen, ist eine Überprüfung mit gekoppelten Modellen notwendig. Die wenigen vorhandenen zeigen, daß die Aussagen für diesen Klimagürtel im wesentlichen erhalten bleiben.

### 3.5.5 Weitere Aspekte

Eine von allen Modellen gestützte Aussage lautet: Zunahme des Niederschlags in hohen nördlichen Breiten. Wie weit dadurch der Abfluß und die Hochwassergefahr zunimmt, ist noch nicht klar, denn gleichzeitig muß nicht nur die Temperaturzunahme, sondern auch die Verteilung des Niederschlags über das Jahr und der Schneeanteil bekannt sein; letztere sind Details des Wasserhaushaltes, die nur wenig zuverlässig berechnet werden.

Für dicht besiedelte Regionen oder Ballungsgebiete mit schon jetzt angespannter Wasserversorgung sind bereits geringfügige Änderungen des Niederschlags und anderer hydrologischer Parameter sehr wichtig. Trotz der zum Beispiel bei erhöhtem Wasserangebot erleichterten Versorgung sollte bedacht werden, daß jede Klimaänderung neue Extremwerte bedeutet und genau diese die Schwierigkeiten für die Wasserwirtschaft bringen. Die Klimaänderungsrate bekommt daher auch hier eine besondere Bedeutung.

Da bisherige Abschätzungen der Wirkung von Klimaänderungen von Gleichgewichtsrechnungen ausgingen, deren Ergebnis eine Abschwächung der Temperaturgegensätze zwischen niedrigen und mittleren Breiten war, sollten sie für Ergebnisse gekoppelter Modelle wiederholt werden, denn diese zeigen keine Reduktion der Temperaturkontraste vom Äquator bis etwa 50°N und 50°S, so daß die Niederschlagsmenge eine Tendenz zur Erhöhung am Äquator und in höheren mittleren bis hohen Breiten zeigt, aber im Mittel keine Änderung oder eine geringe Abnahme in den bereits jetzt relativ trockenen Subtropen.

### 3.5.6 Spezifische Folgen für Mitteleuropa

Da die erwarteten Klimaänderungen nicht ohne Einfluß auf den Wasserkreislauf und damit auf das Abflußverhalten unserer Flüsse bleiben, soll hier für die Region Mitteleuropa eine besondere Betrachtung eingeschoben werden. Aus den vorangegangenen Überlegungen kann bei Erwärmung und Niederschlagszunahme vor allem im Winter auf eine höhere Wasserführung in den Wintermonaten und eine geringere in den Sommermonaten geschlossen werden. Das Abflußregime einiger unserer wichtigsten Flußläufe (Rhein, Donau) ist durch die Alpen geprägt. Der Aufbau der Schneedecke in den Alpen im relativ niederschlagsreichen Winter Mitteleuropas und die Schneeschmelze im späten Frühjahr und im Sommer in den Hochgebirgsregionen sorgt für eine jahreszeitlich relativ ausgeglichene Wasserführung dieser Flüsse. Daher können unsere Flußläufe sowohl wasserwirtschaftlich als auch verkehrstechnisch (Wasserversorgung, Energieerzeugung, Schifffahrt) gleichmäßig über das ganze Jahr hinweg genutzt werden. Eine höhere Lufttemperatur wird die Schnee- und Eisgrenze in den Hochgebirgsregionen verschieben. Damit verringern sich die Flächen, auf denen Wasser in Form von Schnee in den Wintermonaten gespeichert wird. Das bedeutet, daß in der Zukunft mehr Niederschlag sofort abfließen oder nur kurzzeitig in Form von Schnee zwischengespeichert wird. Dieser Effekt wird den Abfluß in den Wintermonaten erhöhen. In den Sommermonaten wird dieser Anteil fehlen. Der Unterschied zwischen Winter- und Sommerabfluß wird also größer werden.

Das Abflußregime im Mittelgebirgsbereich in den Wintermonaten ist derzeit durch einen Wechsel von Schneefall, Aufbau und Abschmelzen der Schneedecke sowie Regen bestimmt. Bei höheren Temperaturen wird dieses Wechselspiel verkürzt und der Regenanteil am Gebietsniederschlag erhöht. Bei Hochwasser hat dies unterschiedliche Auswirkungen. Hochwasser durch Regen bei gleichzeitiger Schnee-

schmelze oder gefrorenem Boden werden weniger häufig auftreten. Dagegen werden allein vom Regen gespeiste Hochwasser häufiger werden. Viele dieser Hochwasser wurden in der Vergangenheit in der kritischen Phase durch Kaltlufteinbrüche gestoppt, wenn Niederschläge wieder als Schnee fallen. Insgesamt ist für die Mittelgebirgsflüsse in den Wintermonaten mit einer höheren allgemeinen Hochwassergefahr zu rechnen. In den Sommermonaten können durch häufigere konvektive Niederschläge (Starkregen) ebenfalls vermehrt lokale Hochwasser auftreten.

Eine Erhöhung der Niederschläge in den Wintermonaten – wie es die Klimamodellen berechnen – hat noch andere Auswirkungen. In Regionen mit gut durchlässigen Böden ist mit einer stärkeren Grundwasserneubildung in den Wintermonaten zu rechnen. In den Sommermonaten wird sich infolge höherer Verdunstung bei gleichbleibenden oder geringeren Niederschlägen die Grundwasserneubildung vermindern. Damit verbunden ist auch eine Erhöhung des kapillaren Wasseranstieges aus dem Grundwasser. Insgesamt wird dadurch wahrscheinlich das Grundwasseraufkommen für gut durchlässige Böden sich leicht verbessern und für weniger gut durchlässige Böden sich verschlechtern (97). Erste Modellrechnungen (98) haben eine Abnahme der nutzbaren Grundwasservorräte in der Region Nord- und Westdeutschland ergeben.

Wegen der höheren Verdunstung infolge des Temperaturanstieges wird erwartet, daß sich bei gleichbleibenden oder geringeren Sommerniederschlägen die Zeiten mit Niedrigwasserführung in den Monaten August bis Oktober verlängern.

Den vorangegangenen Überlegungen liegt die Annahme zugrunde, daß Landnutzung und Vegetation unverändert bleiben. Bekanntlich sind unsere Wälder aber durch Luftverschmutzung stark geschädigt. Es kann davon ausgegangen werden, daß mit zunehmender Erwärmung der Erdatmosphäre, wie bereits ausgeführt, es auch in unseren Breiten zu längeren Trockenzeiten kommen wird, so daß die hochwasserschützende Funktion des dann noch stärker geschädigten Waldes vermindert wird.

#### – Wasserqualität

Mit der Erwärmung der bodennahen Luft durch den zusätzlichen Treibhauseffekt steigen zugleich Wasser- und Bodentemperaturen, wobei sowohl der chemische als auch der biologische Zustand der Gewässer in vielfältiger Weise beeinflusst wird. Außerdem müssen Einflüsse auf aquatische Lebensgemeinschaften in Betracht gezogen werden. In Untersuchungen über die Auswirkungen der Erwärmung von Gewässern durch Einleitung von Kühlwasser aus Kraftwerken wurden einige Erkenntnisse gewonnen, die teilweise auf die hier zu behandelnden Fragen übertragen werden können (99).

Der Sauerstoffhaushalt kann durch eine Temperaturerhöhung auf verschiedene Weise beeinflusst werden. In stark belasteten Gewässern erhöht sich die Gefahr von Fischsterben, und die Änderung des Sauerstoffgehaltes verändert auch die Lebensgemeinschaften in den Gewässern.

Sowohl die Oxidations- als auch Reduktionsvorgänge werden bei höheren Temperaturen beschleunigt. So wird zum Beispiel Ammonium über Nitrit rascher zu Nitrat oxidiert. Bei Sauerstoffmangel tritt mit zunehmender Temperatur vermehrt das schon in kleinen Mengen (mehr als 0,2 mg/l) für Fische giftige Ammonium auf.

Bei Temperaturerhöhung sind weitere Effekte in Gewässern möglich:

- Erhöhung der Korrosion wegen erhöhter Löslichkeit;
- biogene Entkalkung durch Störung des Kalk-Kohlensäure-Gleichgewichtes;
- Anreicherung von Schadstoffen durch erhöhte Verdunstung;
- Erhöhung der Keimzahlen,
- Förderung des Wuchses von Algenarten;
- starke Wirkung von Geruchs- und Geschmacksstoffen durch Wachstumsförderung bestimmter Algenarten.

#### – Wasserwirtschaft

Die Auswirkungen der zu erwartenden Klimaänderungen auf das Abflußregime werden viele Bereiche der Wasserwirtschaft treffen. In vielen Bereichen werden politische Entscheidungen darüber zu treffen sein, welche negativen Auswirkungen hinzunehmen sind und wo größere Eingriffe in den Naturhaushalt zur Sicherung bestimmter Strukturen erfolgen müssen. Nachfolgend werden die Einflüsse in einzelnen Bereichen der Wasserwirtschaft näher diskutiert.

#### – Wasserversorgung

Es ist mit einem erhöhten Wasserbedarf für Haushalte, Industrie und Landwirtschaft in den Sommermonaten zu rechnen. Außerdem wird sich in einigen Regionen die Grundwasserneubildung vermindern, so daß die Wasserversorgung aus dem Grundwasser beeinträchtigt wird. Ein Teil dieses Mehrbedarfs an Wasser kann in einigen Regionen durch direkte Wassergewinnung aus dem Flußlauf oder aus uferfiltriertem Flußwasser aufgefangen werden. Auch ist an die Schaffung von zusätzlichem Speicherraum zu denken, um Versorgungsengpässe überwinden zu können (Talsperren). Durch Anlegen von Vertiefungen zur kurzfristigen Speicherung von oberflächlich abfließendem Wasser, sogenannter farm ponds, auf landwirtschaftlich genutzten Flächen könnte die Grundwasserneubildung erhöht werden. Weiterhin sollten neue Techniken zur Wiederverwendung von Gebrauchtwasser und zur Bewässerung landwirtschaftlicher Flächen entwickelt werden.

#### – Energieversorgung aus Wasserkraft

Wegen geringer Wasserführung in den Flußläufen wird die Energieerzeugung bei den Laufwasserkraftwerken in den Sommermonaten geringer sein. Dem könnte ebenfalls nur durch Schaffung von zusätzli-

chem Speicherraum (Talsperren) oder durch weiteren Gewässerausbau begegnet werden. Wo dies wegen ökologischer Auswirkungen nicht möglich ist, muß auf andere Energieträger ausgewichen werden.

#### – Energieversorgung aus Wärmekraftwerken

Da infolge einer geringeren Wasserführung der Flüsse im Sommer die Kühlwassermenge oft nicht ausreichen wird, muß für die Aufrechterhaltung der Energieerzeugung bei Wärmekraftwerken entweder auf andere Techniken übergegangen werden oder es muß der Wassermehrbedarf durch Überleitung von Wasser aus weiter entfernt liegenden Gebieten erwogen werden. Durch die höheren Wassertemperaturen infolge des Temperaturanstieges ist die nutzbare Aufwärmspanne bei Durchlaufkühlung geringer. Die Effektivität der Kreislaufkühlung ist durch eine Erhöhung der Temperatur des Speisewassers vermindert. Generell muß eine Reduzierung der Verdunstungsverluste bei der Kühlung angestrebt oder auf Trockenkühlung übergegangen werden.

#### – Schifffahrt

Eine geringere Wasserführung in den Sommermonaten führt in ungestauten Fließgewässern zu einer Verminderung der Abladetiefe und somit zu einer Beeinträchtigung oder Einstellung der Schifffahrt. Zur Sicherung des Schifffahrtsbetriebes müssen Flußbettvertiefungen durchgeführt bzw. der weitere Gewässerausbau (Bau von Staustufen und Schleusen) vorangetrieben werden. Auch bei einer Erhöhung der Hochwasserhäufigkeit ist mit einer Beeinträchtigung des Schifffahrtsbetriebes zu rechnen, da die Schifffahrt über einen insgesamt längeren Zeitraum nicht möglich ist. Eine weitere Beeinträchtigung der Schifffahrt ist durch eine verstärkte Sedimentation (siehe bei Bodenschutz) in den Wasserstraßen und dabei besonders in den Stauhaltungen und Hafeneinfahrten zu erwarten.

#### – Hochwasserschutz

Durch die Erhöhung der Hochwasserhäufigkeit und der Hochwasserscheitel werden Menschen und Güter in Siedlungen entlang der Flußläufe stärker gefährdet als heute. Zusätzliche Hochwasserschutzeinrichtungen (Erhöhung der Dämme, Bau weiterer Rückhaltebecken, Verbesserung der Speicherkapazität der Böden in landwirtschaftlichen und städtischen Bereichen) sind zu schaffen. Bei bestehenden Talsperren oder Rückhaltebecken reichen möglicherweise die Hochwasserentlastungsanlagen nicht mehr aus, um einen verstärkten Hochwasserabfluß schadensfrei abzuführen.

#### – Stadtentwässerung

In den Sommermonaten ist mit intensiveren Starkregenfällen zu rechnen. Möglicherweise reichen das bestehende Stadtentwässerungssystem und die Regenüberläufe der Kläranlagen nicht mehr aus.



### – Bodenschutz

Infolge vermehrter Starkniederschläge muß in einigen Regionen dem Bodenschutz mehr Aufmerksamkeit geschenkt werden, um die Bodenerosion in Grenzen zu halten. Durch verstärkte Feststoff- und Geschiebeführung in Fließgewässern erhöht sich die Sedimentation. Dadurch können Talsperren in ihrer Funktion und Lebensdauer beeinträchtigt werden. In solchen Regionen wird auch die Verlagerung von Seen schneller voranschreiten.

### – Gewässerschutz

Eine insgesamt geringere Wasserführung in den Sommermonaten und höhere Hochwasserspitzen verschlimmern die Belastung der Gewässer mit Schadstoffen. Um eine Verschlechterung der Wasserbeschaffenheit zu vermeiden, ist die Gewässerbelastung durch eine verbesserte Abwasseraufbereitung zu reduzieren. Die Fließgewässer sind durch naturnahen Ausbau gegen Erosion zu schützen.

### – Notwendige Untersuchungen

Die Auswirkungen der erwarteten Klimaänderungen auf das Abflußregime konnten bisher nur in Einzelfällen und dann auch nur bei vorgegebenen Klimaänderungen untersucht werden, weil noch keine zuverlässigen Angaben zu Niederschlagsänderungen existieren und den Hydrologen die entsprechenden Instrumentarien (geeignete mathematische Modelle) für derartige Untersuchungen fehlen. Hier muß rasch Abhilfe geschaffen werden, da sonst in absehbarer Zeit keine gesicherten Aussagen über die Auswirkungen von Klimaänderungen auf den Wasserkreislauf möglich sind. Die Wasserwirtschaft benötigt dringend zuverlässige Prognosen für die Änderung des Abflußregimes, um sich langfristig darauf einstellen und mit entsprechenden Planungen beginnen zu können.

Im einzelnen benötigt die Wasserwirtschaft folgende Angaben für zukünftige Werte hydrologischer Parameter:

- mittlere monatliche Abflüsse sowie Wasserstände an Küsten, Ästuarien und Binnenseen;
- Extremwerte der Wasserführung (Hochwasserscheitel und Niedrigstwasser) und bei Niederschlägen;
- Dauer der Unter- und Überschreitung bestimmter Schwellenwerte;
- Häufigkeit extremer Ereignisse;
- Grundwasserneubildung und Grundwasserstände.

Hier ist notwendig:

1. Untersuchung der Verhältnisse in extremen, etwa alle 20 Jahre auftretenden Naß- und Trockenjahren.
2. Entwicklung flächendetaillierter Flußgebietsmodelle, die geeignet sind, den Ablauf bei entspre-

chenden Landnutzungs- und Klimaänderungen mit Hilfe von Szenarien zu simulieren.

3. Auswertung langer Niederschlags- und Abflußreihen mit dem Ziel, Auswirkungen von Klimaänderungen auf das Abflußregime zu erkennen.
4. Vergleiche mit Gebieten, die heute für unsere Regionen erwartete Verhältnisse zeigen.
5. Rekonstruktion der Abflußverhältnisse aus Proxy-Daten und historischen Aufzeichnungen für frühere Zeiträume mit vergleichbaren Klimaverhältnissen.

### 3.6 Fischfang

Die Verbreitung bestimmter Fischarten hängt sehr stark von der Hydrographie, also der Verteilung von Temperatur und Salzgehalt sowie den Strömungsverhältnissen im Ozean ab. Da die meisten Speise- und Nutzfischarten in der Oberflächenschicht des Ozeans leben, wo sich Temperatur und Salzgehalt sowie die Strömung im Laufe eines Jahres, aber auch bei Klimaänderungen, am stärksten verändern, werden die bevorstehenden raschen Klimaänderungen das Auftreten bestimmter Fischarten, ihrer Häufigkeit und ihre Wanderungseigenschaften stark verändern. Besonders an den Rändern des bisherigen Verbreitungsgebietes werden die Verschiebungen zuerst zu beobachten sein (100).

Einen Hinweis auf die möglichen Veränderungen gibt die Beobachtung in diesem Jahrhundert. Die Erwärmung der Ozeandeckschicht um im Mittel nur einige Zehntel Grad, vor allem in der ersten Hälfte des Jahrhunderts, führte zum Vordringen tropischer und subtropischer Arten nordwärts in die gemäßigten Zonen und zum Einzug von Fischarten kalt-gemäßigter Zonen in die zuvor nur von polaren Arten bewohnten Gebiete. Dabei war der kommerzielle Fischfang positiv wie negativ betroffen. Während zum Beispiel vor Nordskandinavien der Heringsfang in den vierziger und fünfziger Jahren zunahm, ging er in der Nordsee gleichzeitig stark zurück. Ein weiteres Beispiel ist die Verfolgung einer Wassermassenanomalie (101) im Nordatlantik, die mit starken Anomalien bei der Anzahldichte einiger Fischarten verbunden war. Die Salzgehaltsanomalie entstand in den Sechzigern vor Ostgrönland, wurde um Grönland herum in die Labradorsee verfrachtet, in ihr südwärts geführt und vom Nordatlantischen Strom erfaßt, überquerte den Atlantik und erreichte 1979/80 die Barentssee. Sie wird mit der veränderten Verteilung des skandinavischen Herings im Sommer in Verbindung gebracht. Wenn also bereits Anomalien mit einigen Jahren Dauer solche für die Fischerei weitreichenden Folgen haben können, dann sollten systematische Änderungen der Temperatur, des Salzgehaltes und des Nährstoffangebotes an einem Ort, als sichere Folge einer globalen Klimaänderung, stark die Verteilung der Fischarten, ihr Wachstum und die Fortpflanzung beeinflussen. Besonders betroffen werden die schon jetzt weniger produktiven Regionen bei einem weiteren Rückgang der Produktion sein, ähnlich wie die Ernte in semiariden Gebieten auf den Kontinenten bei geringfügiger Abnahme der Bodenfeuchte drastisch

schrumpft, während Gebiete mit Produktivitätssteigerung bei wachsender Ernte sogar gleich hohe Fischzahl erhalten können.

Da die biologisch produktivsten Zonen des Weltmeeres auf wenige relativ kleine Auftriebsgebiete vor den Westküsten der Kontinente beschränkt sind und das Nährstoffangebot für Phytoplankton als der Basis der Nahrungskette in diesen Gebieten letztlich von der Rate der Tiefenwasserbildung in hohen Breiten des Nordatlantiks und in der Weddell-See abhängt, sind die produktivsten Fischfanggebiete auch von diesem Zweig des weltweiten Wasserkreislaufs direkt betroffen. Bisher ist in den Auftriebsgebieten, außer vor Peru im Jahre 1972/73, kein wesentlicher Rückgang der Nutzfischarten registriert worden. Sollte jedoch die zur Zeit im wesentlichen auf den Atlantik beschränkte Tiefenwasserbildung zurückgehen, wie es ein gekoppeltes Ozean-Atmosphäre-Modell bei 100 Jahren Kopplungszeit andeutet (102), dann wird langfristig der aus Massenerhaltungsgründen notwendige Anstieg nährstoffreichen Tiefenwassers (gegenwärtig ist im Mittel ein Aufquellen mit etwa 1,2 cm/Tag notwendig) reduziert, mit vielen bisher nicht abschätzbaren Folgen für die Nahrungskette im Ozean. Auch der globale Kohlenstoffkreislauf wäre davon stark betroffen.

Wenn die Ozonkonzentration in der Stratosphäre zurückgeht und in der Troposphäre nicht entsprechend steigt, gelangt notwendigerweise mehr UV-B Strahlung auf die Erdoberfläche. Das hat nicht nur Bedeutung für Mensch, Tier und Pflanze an Land sondern auch für Phytoplankton (vgl. Abschnitt D, 4. Kapitel, Nr. 4) und nahe zur Wasseroberfläche lebende Fische und andere Meerestiere. Viele Fischeier und Fischlarven schweben an oder nahe zur Wasseroberfläche und sind daher besonders gefährdet, zum Beispiel die Larven des Anchovis, der Krabben und einiger Krebse. In welchem Ausmaß bei den erwarteten oder schon eingetretenen höheren UV-B-Strahlungsdosen ganze Populationen betroffen sind, ist ungewiß, doch wird eine möglicherweise reduzierte Nettoprimärproduktion des Phytoplanktons Auswirkungen auf die Nahrungskette haben (vgl. Abschnitt D, 4. Kapitel, Nr. 4.4)).

Die jüngste Vergangenheit hat gezeigt, daß die menschlichen Gesellschaften dann, wenn der Ertrag der Fischfänge aufgrund von natürlichen Faktoren und Überfischung zurückging, die Situation meist verschärft haben, indem sie besonders intensiv weiter fischten. Sehr häufig haben Industrie und Regierung wissenschaftlichen Rat nicht akzeptiert und Maßnahmen zum Schutz des Fischbestandes nicht getroffen. Eine weltweite Erwärmung wird bei unverändertem Verhalten den Kollaps einiger Fischereizonen verursachen, vor allem, wenn der Fischfang für die Wirtschaft des Landes bedeutend ist. Beispiele für eine solche starke Abhängigkeit sind Mauretanien, Namibia, Peru und Somalia. Ein berühmtes Beispiel ist der mit dem El Niño von 1972 einhergehende Zusammenbruch der peruanischen Fischindustrie, als Überfischung und Ausfall des Nachwuchses eine jahrelange Krise auslösten (103). Der beste Weg, solche Zusammenbrüche als Folge einer Klimaänderung zu vermeiden, ist eine verstärkte internationale, besser weltweite Zusammenarbeit mit festgelegten und über-

wachten maximalen Fangmengen, für die es fast noch keine Beispiele gibt.

### 3.7 Küstenzonen

Sicherlich ist der Meeresspiegelanstieg der wesentlichste Faktor bei der Abschätzung einer Wirkung einer Klimaänderung auf die Küstenzonen. Bei kontinuierlichem Spurengasanstieg ohne Versuch einer Eindämmung des zusätzlichen Treibhauseffektes ist nicht nur mit einer Erwärmung um einige Grad im nächsten Jahrhundert zu rechnen, sondern auch mit einem Meeresspiegelanstieg um bis zu einem Meter. Diese Zahlen liegt nahe dem Maximalwert (vgl. Nr. 3), gültig bei hoher Empfindlichkeit des Klimasystems von 4,5°C mittlerer globaler Erwärmung für die äquivalente CO<sub>2</sub>-Verdoppelung, die schon im Jahre 2025 ohne Gegenmaßnahmen erreicht sein wird. Die überwiegend für einen Meeresspiegelanstieg von einem Meter bis zum Jahre 2100 diskutierten Szenarien sollten daher durch solche ergänzt werden, die nur einen halb so hohen Anstieg vorgeben.

Erhöhter Meeresspiegel bedeutet zumindest

- Überschwemmung ungeschützter Marschniederungen,
- Verschiebung von Feuchtgebieten,
- Erosion von Küsten,
- erhöhte Sturmflutgefahr,
- weitere Versalzung von Ästuarien,
- Bedrohung der küstennahen Trinkwasserversorgung,
- veränderte Amplitude der Gezeiten,
- veränderter Sedimenttransport.

Da ein großer Teil, nämlich etwa die Hälfte der Weltbevölkerung, an oder in der Nähe der Küste wohnt und dicht besiedelte Marschniederungen schon jetzt Problemzonen sind, werden die Folgen des „langsam“ steigenden Meeresspiegels von anderen vom Menschen verursachten Problemen kaum zu trennen sein. Ein weiteres Problem der Szenarien ist die unterschiedliche Ausgangsbasis für die Abschätzung einer Wirkung. Hat das Referenzszenario ohne Klimaänderung zum Beispiel eine Weiterentwicklung der Besiedlung, des Schutzes, oder der Nutzung der Küstenzone beachtet? Meist nicht, so daß der sozio-ökonomische Einfluß erhöhten Meeresspiegels oft noch unterschätzt wurde.

#### 3.7.1 Gefährdung der Bevölkerung in Marschniederungen und auf Inseln

Das einfachste Maß einer Bedrohung durch den Meeresspiegelanstieg ist der Prozentsatz der Bevölkerung eines Landes, der unter einer bestimmten Höhe über dem Meeresspiegel lebt. Da die Hälfte der Menschen in Küstennähe lebt und die am dichtesten besiedelten Gebiete dazu gehören, bedroht ein Anstieg des Meeresspiegels um nur einen Meter ganze Nationen (104).

Länder auf Atollen wie Kiribati, Tokelau, Tuvalu, Cocos Island, Keeling Insel, Marshall Inseln liegen weniger als drei Meter über dem Meeresspiegel, sind meist schmal und haben keine Ausweichmöglichkeit. Noch bedeutender von der Zahl der betroffenen Menschen her gesehen ist die bei einem Meter Meeresspiegelanstieg drohende Überschwemmung von 12 bis 15 Prozent des ägyptischen Ackerlandes (105) und von 17 Prozent des Staatsgebietes von Bangladesh (106). Ebenso stark betroffen wären Indonesien und Vietnam; die Deltas der großen Flüsse Nil, Ganges, Yangtse, Hwangho, Mekon, Irrawadi, Indus, Niger, Parana, Magdalena, Orinoco, Amazonas, Mississippi und Po könnten um Kilometer zurückgedrängt werden und viele Dörfer mit Millionen Menschen hinter der neuen Küstenlinie zurücklassen.

Es wird davon ausgegangen, daß weltweit 345 335 km Küste, meist in Marschniederungen, 6 400 km in Küstenstädten, 10 725 km Sandstrände und 1 756 km<sup>2</sup> Hafensfläche überhaupt oder besser geschützt werden müßten (107).

An steileren Küsten wäre weniger die Überschwemmung als vielmehr die Erosion der Küste eine Bedrohung. Das gilt nicht nur für viele Strände der Vereinigten Staaten von Amerika, wo schon ein 30 cm-Anstieg die Strände beseitigen und pro Kilometer Schäden in Höhe von mehreren 10 Millionen Dollar verursachen würde (108), sondern auch für Inseln wie Sylt, die bei einem Meeresspiegelanstieg um einen Meter nur durch weit intensivere Schutzmaßnahmen auf Dauer zu erhalten ist.

### 3.7.2 Sturmfluten

Mit jedem Dezimeter Meeresspiegelanstieg werden große, bisher bei Stürmen bestimmter Stärke noch unbetreffene Gebiete überschwemmt, denn ein erhöhter Meeresspiegel erhöht das Überschwemmungsrisiko dreifach: erstens durch ein höheres Ausgangsniveau, zweitens wird der bisherige natürliche Schutz vor den Wellen wie Strände, Dünen, Mangroven reduziert, und drittens stellt das Hochwasser der Flüsse eine stärkere Bedrohung dar, da sich der Abfluß verzögert. Der erste Grund wäre besonders bedeutend in Gebieten häufiger starker Stürme wie in der Karibik, dem Süden der Vereinigten Staaten von Amerika und dem indischen Subkontinent. Ein Anstieg um einen Meter würde auch in Japan 1 700 km<sup>2</sup> mit vier Millionen Menschen bedrohen (109). In Bangladesh wären alle drei Verstärkungsfaktoren wirksam, wenn wie 1987 Hochwasserscheitel des Ganges und Brahmaputra zusammentreffen (mehr als 10 Millionen Menschen mußten damals ihre Wohnungen verlassen), die schützenden Mangrovenwälder weiter schwinden und einer der häufigen Wirbelstürme mit der Monsunflutwelle der Flüsse zusammentrifft. Eine weitere zusätzliche Bedrohung stellt eine sehr wahrscheinliche Zunahme der Intensität tropischer Wirbelstürme dar, die bei erhöhter Temperatur des Meerwassers größere Gebiete als bisher bedroht und vor allem die Inselnationen in den Tropen betrifft, wo, wie auf den Malediven (ohne direkten Wirbelsturmeinfluß), die Dünung eines in der Ferne vorbeiziehenden besonders starken Wirbelsturmes schon heute aus-

reicht, um die Hauptstadt Male zu überschwemmen. Ob die Zahl der Sturmfluten in den mittleren Breiten zunimmt und bei steigendem Meeresspiegel die Gefährdung potenziert, kann nicht als besonders wahrscheinlich bezeichnet werden. Allerdings deuten die Ergebnisse der gekoppelten Ozean-Atmosphäre-Modelle, die zunächst eine noch größere Verzögerung der Erwärmung als bisher angenommen berechnen, eher auf eine Verstärkung der Temperaturgradienten zwischen Äquator und mittleren Breiten hin. Auf eine verringerte Intensität der atmosphärischen Zirkulation und weniger starke Stürme läßt das also nicht schließen.

### 3.7.3 Wasserversorgung und Wasserqualität

Ein Meeresspiegelanstieg bewirkt an allen Küsten und in allen gezeitenabhängigen Mündungstrichtern der Flüsse ein weiteres Vordringen salzhaltigen Wassers. So ist für den Delaware-Fluß bei 50 cm Anstieg des Pegels ein Vordringen des Brackwassers um 10 bis 20 km vorhergesagt worden (110), was zum Beispiel die Wasserversorgung der Stadt Philadelphia direkt bedrohen würde. Ähnliches kann für jedes Ästuar vorhergesagt werden, auch wenn die Oberwassermenge konstant bleibt. Nähme sie wegen erhöhter Verdunstung bei gleichem Niederschlag im Einzugsgebiet des Flusses ab, dann würde das Brackwasser bei besonders niedrigem Oberwasser noch weiter flüßauf wandern. An der Elbe zum Beispiel schwankt die Brackwassergrenze nicht nur um etwa 10 km innerhalb einer Gezeit, sondern um etwa 50 km von Brunsbüttel bis Stade zwischen Winterhochwasser und extremem Niedrigwasser wie im Sommer 1990. Auch die Bewässerung vieler landwirtschaftlicher Kulturen müßte wegen Brackwassereinbruchs gestoppt werden, denn bewässert wird insbesondere dann, wenn bei Dürre das Brackwasser besonders stark stromauf gewandert ist.

Eine besondere Trinkwassergefährdung würde den Inselnationen bevorstehen, deren Süßwasserlinsen über Salzwasser bei den häufigeren Überschwemmungen versalzt oder zerstört werden. Für Atolle brächte eine Einengung eines Atolls um 20 Prozent einen Verlust an Frischwasser um 50 Prozent (111). So würde einem bescheiden erscheinenden Meeresspiegelanstieg von Dezimetern über die Trinkwasserversalzung eine zerstörerische Wirkung für eine ganze Inselnation folgen.

Bisher ist nur von der Versalzung des Wassers in Küstengebieten und besonders in Ästuaren gesprochen worden. Erhöhter Meeresspiegel und Erwärmung gefährden aber auch die Qualität des Süßwassers oberhalb der Brackwassergrenze durch Verseuchung mit Giftstoffen aus alten und neuen Mülldeponien, die bei erhöhtem Meeresspiegel vom Grundwasser erreicht werden. So haben die Niederlande bereits jetzt besondere Vorkehrungen für alle Mülldeponien getroffen, indem sie zum Grundwasser hin dicht gehalten werden müssen. Genauso ist bei erhöhtem Grundwasserstand die Funktionsweise der Rieselfelder gefährdet, die mindestens 1,50 Meter über dem Grundwasser liegen sollten. Aber auch verminderte Durchmischung wegen der erhöhten Temperatur und des erhöhten

Wasserstandes in Ästuaren steigert die Sauerstoffzehrung in sonst schon belasteten Flußläufen und führt zu Fischsterben.

### 3.7.4 Ökologische Folgen eines Meeresspiegelanstiegs

Während für die in einer Marschniederung bei steigendem Meeresspiegel drohende Überschwemmung die Anstiegsrate zwar hohe aber keine besonders herausragende Bedeutung hat, weil die erste große Überschwemmung bei einem extremen Sturm die Bevölkerung in die Flucht treibt, ist für die Verlagerung der küstennahen Feuchtgebiete die Anstiegsrate das Kriterium. Ist sie klein genug, dann verschieben sich Feuchtgebiete systematisch, oder die erhöhte Sedimentation hält es sogar stabil. Die verschiedenen Abschätzungen des Feuchtgebietverlustes bei gegebenem Meeresspiegelanstieg ohne Beachtung der Anstiegsrate haben trotzdem folgendes klar herausgestellt: Die Feuchtgebiete sind immer dann besonders bedroht, wenn angrenzende vom jährlichen Hochwasser nicht erreichte trockenere Zonen nicht als neues Feuchtgebiet zur Verfügung gestellt werden und wenn der Tidenhub (Differenz zwischen Ebbe und Flut) klein ist. Für die Bundesrepublik Deutschland hat der erste Teil dieser Aussage eine bedeutende Konsequenz: Wer dem Wattenmeer bei rascherem als dem bisherigen Meeresspiegelanstieg die physikalische Basis nicht weiter entziehen will, muß heute nicht zum Wattenmeer gehörendes Gebiet der regelmäßigen Überflutung opfern.

Die Bedeutung und die Bedrohung der küstennahen Feuchtgebiete wird von folgenden Zahlen und Befunden unterstrichen:

- Feuchtgebiete an Küsten erreichen oder übertreffen die Biomasseproduktion aller anderen natürlichen Ökosysteme und schon gar die aller landwirtschaftlichen Anbaumethoden;
- zwei Drittel der Speisefische hängen zumindest in Teilen ihres Lebens von Salzmarschen, Wattgebieten und küstennahen Sümpfen sowie Lagunen ab;
- von mindestens 730 000 km<sup>2</sup> Feuchtgebiet (112) entlang der Küsten von 120 Ländern gehört etwas mehr als die Hälfte zu nur acht, nämlich Mexiko, Brasilien, Argentinien, Kuba, Indonesien, Papua-Neuguinea, Vietnam und Malaysia;
- 88 Prozent aller küstennahen Feuchtgebiete haben eine Bevölkerungsdichte unter 10 Personen/km<sup>2</sup> und werden sich daher, weil ohne Küstenschutz, landeinwärts bewegen;
- etwa 5, höchstens 10 Prozent der Feuchtgebiete würden durch Küstenschutz verlorengehen, wenn der Meeresspiegel im nächsten Jahrhundert um einen Meter steigt;
- der Hauptverlust an heutigen Feuchtgebieten würde also durch Verlagerung und nicht durch Küstenschutz auftreten, wenn Küstenschutzmaßnahmen weiterhin an so wenigen Prozent aller Küsten ergriffen werden;

- ein Meeresspiegelanstieg von einem Meter bis zum Jahre 2100 entspricht der höchsten natürlichen Anstiegsrate beim Zusammenbruch der großen Inlandeisgebiete nach dem Ende einer intensiven Vereisung wie vor 18 000 Jahren, als Inseln und viele Schelfgebiete im Meer versanken, die natürliche Anlagerung in Feuchtgebieten also keineswegs Schritt halten konnte.

Daß eine rasche Wanderung oder der Verlust von Feuchtgebieten an der Küste viele Pflanzen und Tiere bedroht, also die Artenvielfalt gefährdet ist, muß – obwohl Allgemeingut – auch hier wieder erwähnt werden.

### 3.7.5 Rückzug von Küstenlinien

Nach Beobachtungen weltweit (113) zogen sich im vergangenen Jahrhundert 60 Prozent aller Sandküsten zurück, 30 Prozent schienen stabil und nur 10 Prozent wuchsen. Ob dieser Rückzug bereits wesentlich Folge des Meeresspiegelanstiegs ist oder eher durch Wind und Wellen verursacht wird, ist unklar. Da die meisten Strände eine Neigung von 1 : 100 oder weniger haben, bedeutet ein Meter Meeresspiegel etwa 100 Meter Verlust an Strandbreite. So zog sich die sehr flache Küste in der Nähe der Mississippi-Deltaregion von Louisiana jährlich um etwa 4 Meter zurück (114), weil dort ein Meeresspiegelanstieg von einem Zentimeter pro Jahr auftritt. Während an den Küsten der Kontinente oder großer Inseln bei Landeinwärtsverlagerung der Strand nur dann in seiner Existenz gefährdet ist, wenn Schutzbauwerke für Häuser und Straßen vorhanden sind, ist das Fortbestehen kleiner Inseln generell gefährdet. Am stärksten bedroht sind die Koralleninseln im tropischen Bereich, die allerhöchstens bis zum maximalen Zuwachs von acht Millimeter pro Jahr gegen einen Meeresspiegelanstieg angehen können. Auch Schutzmaßnahmen sind dann anders als an Kontinentküsten nicht effektiv.

Die vielen Sandbänke, Inseln und Korallenriffe vor Küsten stellen einen effektiven Schutz vor Stürmen dar. Auch sie sind bei einem raschen Meeresspiegelanstieg nicht mehr Schutz genug, obwohl die Sandbänke und Korallenriffe wegen ihrer Mobilität bzw. ihres Wachstums mit einem Meeresspiegelanstieg zum Teil Schritt halten können. Die Sandbänke würden allerdings in Richtung auf die Hauptküste verlagert und wären schließlich bei ausreichend raschem Anstieg – ein Meter pro Jahrhundert wäre ein solcher – mit der Küste vereint und kein Schutz mehr.

Die vielfältigen Schutzmaßnahmen an Stränden, Hafeneinfahrten und für Küstenstädte müssen weltweit drastisch verstärkt werden und die dazu notwendigen Kosten sind für Teile eines Landes und verschiedene Anstiegsraten bzw. Anstiege geschätzt worden. In allen Fällen bleibt das für reiche Nationen im Promillebereich des Bruttoinlandsproduktes, erreicht aber zum Beispiel für die Malediven bei einem Meter Anstieg bis 2100 34 Prozent des jährlichen Bruttoinlandsproduktes. Daher ist die Rettung dieses Inselstaates nur bei internationaler Kooperation entweder durch rasche Eindämmung des zusätzlichen Treibhauseffektes oder direkten lokalen Schutz möglich.

### 3.8 Siedlungen des Menschen

Der Einfluß von Klimaänderungen auf jede Art menschlicher Siedlungen und Haustypen kann nur sehr schwer von anderen Einflüssen, die meist nicht konstant bleiben, getrennt werden. Trotzdem sind einige Wirkungen von Klimaänderungen relativ sicher vorherzusagen, weil sie entweder schon bei einem nur mäßigen Meeresspiegelanstieg eintreten oder aber weil die Situation schon prekär ist und bereits geringfügige Änderungen großen Einfluß haben können. Es ist klar, daß im Sahel eine verstärkte Dürre und in Bangladesch eine noch verheerendere Flut als die in den Jahren 1987 und 1988 Millionen Menschen von ihrem bisherigen Wohnort vertreiben würde.

Viele Auswirkungen von Klimaänderungen können die Wohnung von Menschen bedrohen oder zerstören und sie oft vom bisherigen Wohnort vertreiben: Meeresspiegelanstieg, Überschwemmung, tropische Wirbelstürme, Wasserknappheit, Nahrungsmangel, Brennholzmangel, Permafrostschwund. Viele dieser Auswirkungen außer Meeresspiegelanstieg und Permafrostschwund sind in erster Linie Folge der Niederschlagsänderungen. Die eindeutigste Bedrohung ist diejenige durch einen Meeresspiegelanstieg.

#### – Meeresspiegelanstieg

Die am dichtesten besiedelten Gebiete liegen an der Küste und dabei bevorzugt in Deltas und Marschniederungen. Ein Meeresspiegelanstieg um einem Meter – etwa dem Maximum der Projektionen für das nächste Jahrhundert – bedeutet Verlust der Heimat für viele Millionen Menschen, vor allem in den Entwicklungsländern, Unbewohnbarkeit vieler Koralleninseln und damit Ende zum Beispiel der Staaten Malediven, Tuvalu, Kiribati und Marschall-Inseln. Besonders betroffen sind die Deltas folgender Flüsse: Nil, Ganges, Jangtse-kiang, Hoang-ho, Mekong, Irrawadi, Indus, Niger, Parana, Magdalena, Orinoco, Amazonas, Mississippi, Po (115). Aber auch viele andere kleinere Deltaregionen, vor allem in den Tropen, sind direkt gefährdet. So hat das Umweltministerium Indonesiens (116) in einer ersten Übersicht folgendes Beispiel für viele festgehalten: Im Distrikt Karawang auf Java würden bei einem Meter Meeresspiegelanstieg 11 000 Hektar Fischzuchtteiche verloren gehen, 50 000 Hektar Anbaufläche versalzen und 80 000 Haushalte ihren Lebensunterhalt verlieren.

Bei einem geringeren Meeresspiegelanstieg von „nur“ 20 bis 50 cm, wie er schon bis 2050 eintreten könnte, ist bereits die Wasserversorgung der Inselstaaten gefährdet bzw. zerstört und im obigen Beispiel aus Indonesien sind zwar weniger Menschen bedroht, aber noch immer werden viele vertrieben; denn bei 70 000 km Küstenlinie mit überwiegend Marschniederung kann Indonesien einen Küstenschutz wie an unseren nordwesteuropäischen Küsten nicht finanzieren.

#### – Überschwemmung

Nach dem Klimamodell, dessen Ergebnisse bisher im Hinblick auf das Thema Klima- Extreme untersucht

worden sind, verstärkt der zunehmende Treibhauseffekt die „Variabilität des Niederschlags“ fast an allen Gitterpunkten des Modells. Überschwemmungen sollten demnach zunehmen und zusammen mit dem erhöhten Meeresspiegel vor allem wieder die niedrig liegenden Marschen betreffen. Für viele Länder wie zum Beispiel Bangladesch und Indonesien nimmt deshalb die Überschwemmungsgefahr auch bei geringerer Klimaänderung als im Szenario „Business as Usual“ vorherberechnet stark zu; das bedeutet: auch bei Maßnahmen zur Eindämmung des zusätzlichen Treibhauseffektes müssen die Länder mit Marschniederungen schon jetzt Pläne zur Anpassung an häufigere und schwerere Überschwemmungen entwickeln und umsetzen.

#### – Wirbelstürme

Schon heute ist die Zerstörungskraft tropischer Wirbelstürme eine Behinderung der wirtschaftlichen Entwicklung in der Karibik und anderswo. Nimmt die Zahl und die Intensität der Stürme zu, und weitet sich das betroffene Gebiet aus, wie es bei höherer Ozeanoberflächentemperatur physikalisch plausibel vorhergesagt wird, dann wird diese Behinderung in vielen – vor allem tropischen – Regionen größer. Wenn auch Wirbelstürme nur bei Wassertemperaturen über etwa 27°C entstehen können, so treffen sie doch auch Küstenregionen und Inseln mittlerer Breiten beider Erdhälften. Nach Aussagen der großen Versicherungsgesellschaften liegt der Versicherungsschaden durch Wirbelstürme weit über dem durch Erdbeben (117). Er entsteht wesentlich auch in industrialisierten Ländern wie den Vereinigten Staaten von Amerika und Japan. Ob die Küsten Europas und die westeuropäischen Länder in Zukunft im Spätsommer und Herbst häufiger von Sturmtiefs, die gelegentlich aus tropischen Wirbelstürmen hervorgehen, getroffen werden, ist zur Zeit nicht ausreichend genau abzuschätzen.

#### – Dürre

Wenn beide Extrema des Wasserkreislaufes, Überschwemmungen und Dürren, bei erhöhtem Treibhauseffekt zunehmen, wie aus zeitabhängigen Klimamodellrechnungen erschlossen wird, dann wären vor allem die Kleinbauerdörfer und die Nomaden in den semiariden Gebieten, aber auch die Siedlungen in wichtigen Anbaugebieten der hochentwickelten Länder betroffen. Da die Zunahme der trockenen Abschnitte, die im Kontrolllauf des Klimamodells für den Zeitabschnitt von 1965 bis 1985 5 Prozent der Zeit ausmachten, schon auf 10 Prozent im Jahre 1990 ansteigen und 2020 sogar 25 Prozent erreichen sollten (was bisher von anderen Modellstudien aber nicht bestätigt ist), muß die obige Aussage mit aller Vorsicht behandelt werden. Sollte sie sich bestätigen, wäre dies eine für die Ernährung der Menschen und sicher auch für die Besiedlung in vielen Regionen besonders wichtige Folge eines zusätzlichen Treibhauseffektes in der Übergangsphase bei noch steigender Emission von Spurengasen.

Daß bei häufigerer Dürre die Biomasse abnimmt, stellte für viele Entwicklungsländer ein gravierendes Problem dar, denn ihre Energieversorgung beruht auf der Verbrennung von Biomasse. Die meisten afrikanischen Länder hängen zu über 80 Prozent davon ab, in vielen herrscht schon jetzt Brennholzangel.

#### – Schwund des Permafrostes

Die über dem globalen Durchschnitt liegende Erwärmung hoher nördlicher Breiten sowohl in Klimamodellergebnissen als auch in Befunden der Klimageschichte und direkten Beobachtungen der vergangenen 150 Jahre deutet darauf hin, daß in der Zukunft die ständig gefrorenen Böden (über 20 Millionen km<sup>2</sup>) in der Sowjetunion, China, Kanada und Alaska und anderen Ländern tiefer auftauen oder verschwinden könnten. Der tiefer auftauende Boden verliert häufig mehrere Meter mächtige Eislinsen, dieses führt zur Beschädigung, oft zur Zerstörung von Häusern, Straßen und Brücken sowie zu Erdbeben. Da das Auftauen ein Jahrhunderte dauernder Vorgang ist, werden solche Regionen sehr lange ein für Neubauten und Straßenbau sehr schwieriges Gebiet sein.

#### – Verstärkende Faktoren

Vor allem in den Entwicklungsländern gibt es viele die Abhängigkeit von Klimaänderungen verstärkende Faktoren, von denen hier nur die wichtigsten genannt werden:

- erstens: die starke direkte Abhängigkeit von der Nahrungsmittelproduktion vor Ort, die in semiariden Gebieten Afrikas schon jetzt zu Hungerkatastrophen führt und Teilgebiete entvölkert hat,
- zweitens: die fehlenden Finanzmittel, um sich zum Beispiel gegen Überschwemmung und Meeresspiegelanstieg zu schützen,
- drittens: die Konzentration der armen Bevölkerung in riesigen rasch wachsenden Städten, besonders in den überschwemmungsgefährdeten Teilen.

### 3.9 Energieversorgung

Die Folgen erhöhter Temperatur und veränderten Niederschlags für die Energieversorgung eines Landes sind sowohl für die Erzeugungsseite als auch den Verbrauch bedeutend. Je nach vorherrschendem Klimatyp kann eine Erwärmung zu erhöhtem, verringertem oder anders zeitlich verteiltem Bedarf führen. In Florida stiege er wegen erhöhter Kühlung von Gebäuden, in Norddeutschland sank er wegen verringerten Heizungsbedarfs bei geringerer Winterkälte, in Südeuropa verschob sich der Hauptbedarf in Richtung Hitzewellen. Je stärker die Niederschlagsabnahme, um so stärker ist die Bereitstellung von Energie behindert, solange direkte Sonnenenergienutzung einen unwesentlichen Teil der Energieversorgung ausmacht. Denn die Stromerzeugung durch Wasserkraft würde sinken, Kühlwasser für Wärmekraftwerke knapp werden und weniger Brennholz nachwachsen. Nimmt der

Abfluß bei kräftiger Niederschlagszunahme jedoch zu, wird die Wasserkraft ein bedeutenderer Teil der Energieversorgung. Das Flußdiagramm in Abbildung 7 versucht die Beziehung zwischen Klimaparameteränderungen, Energiebedarf, Energieversorgungssystemen und Energiepolitik aufzuzeigen. Obwohl es keineswegs vollständig ist, zeigt es doch die vielfältigen Wirkungen einer Klimaänderung. So beeinflusst die Niederschlagsabnahme auch die Wärmekraftwerke, weil diese überwiegend mit Flußwasser gekühlt werden und bei Wassermangel abgestellt werden müssen, wie zum Beispiel im Sommer 1990 einige Kernkraftwerke in Frankreich. Im Falle einer reduzierten Bodenfeuchte verschiebt sich in Ländern mit überwiegend durch Brennholz gedeckter Energieversorgung, wie zum Beispiel in den meisten afrikanischen Ländern, die Energieversorgung in Richtung fossiler Energieträger, die Anlaß für den Bodenfeuchteschwund waren. Regionen mit hohem Heizbedarf werden von einer Erwärmung natürlich profitieren. Dabei ist allerdings der Einspareffekt wesentlich von der mittleren Temperatur der Heizperiode abhängig. Beträgt diese wie in unserem Klima zum Beispiel 5°C und wird der Wohnraum auf 20°C erwärmt, so brächte eine Erwärmung der Außenluft um 1°C einen Einspareffekt von einem Fünftel bei gleicher Länge der Heizperiode. Da diese jedoch verkürzt wird, ist der Effekt größer und liegt bei typischen Altbauten bei 8 Prozent. Er kann weiter stark steigen, wenn durch gute Isolierung und passive Solarheizung die Heizperiode weiter verkürzt wird. Je maritimer ein Klima, um so kräftiger die Einsparung, je kontinentaler um so geringer, denn im Inneren Sibiriens würde bei minus 10°C mittlerer Temperatur während der Heizperiode und nur geringfügig verkürzter Heizperiode die Einsparung bei 1°C Erwärmung auf nur 3 bis 4 Prozent sinken.

Insgesamt sind die durch verbesserte Isolierung und energiebewußtes Bauen erzielbaren Einspareffekte jedoch weit höher als die bei Erwärmung zu erwartenden.

Schätzungen für die Vereinigten Staaten von Amerika bzw. Japan über Einfluß der 2 \* CO<sub>2</sub>-Gleichgewichtsklimaänderungen auf dem Energiesektor Elektrizität haben einen Verbrauchszuschlag zwischen 5 und 10 Prozent für das Jahresmittel abgeschätzt. Bei einem stark erhöhten Spitzenbedarf während sommerlicher Hitzewellen, würde dies im Süden der USA 30 Prozent Kapazitätswachstum notwendig machen (118). Im Norden der USA hielten sich Abnahme im Winter und Zunahme im Sommer in etwa die Waage. Für die Bundesrepublik Deutschland wurde errechnet, daß je nach Gebäudetyp eine Temperaturzunahme um 1°C sehr unterschiedliche mit Isolierung ansteigende Einspareffekte bewirkt, die aber weit geringer sind als die bei Anwendung verbesserter Isoliertechnik. Die Planer von Kraftwerkskapazitäten einzelner Industrieländer, die mit ähnlichen Unsicherheiten in der Verbrauchsentwicklung wie denen wahrscheinlich durch Klimaänderungen verursachten schon bisher gerechnet haben, sollten zwar den neu hinzukommenden Faktor beachten, müssen aber ihre Planungen nicht wesentlich ändern.

Für die Entwicklungsländer, in denen nur ein kleiner Teil der Stromerzeugung für Kühlung von Gebäuden

verwendet wird, ist die bei Erwärmung wahrscheinliche Bedarfserhöhung gering in Anbetracht der sonstigen Unsicherheiten in der Bedarfsentwicklung.

– **Wasserkraft**

Der elektrische Strom (auch der für die Heizung) stammt in vielen Ländern (Industrie- und Entwicklungsländer) zu einem hohen Prozentsatz aus der Nutzung von Wasserkraft. Da der Abfluß meist ein Restglied in der Wasserbilanz einer Region ist, können vergleichsweise geringe Niederschlagsänderungen die Stromerzeugung stark erleichtern oder erschweren oder aber wesentlich innerhalb eines Jahres um-

verteilen. Regionen mit intensiver Nutzung von Wasserkraft, wie die der großen Seen in Nordamerika, oder noch stärker die Staudämme in semiariden oder ariden Gebieten würden bei recht gering erscheinenden Niederschlagsänderungen bereits wesentlich an Wasserkraftkapazität einbüßen. Allein die kanadischen Wasserkraftwerke an den großen Seen würden bei vorhergesagten 2 \* CO<sub>2</sub>-Klimaänderungen durch verminderten Zufluß und dadurch erhöhtem anderweitigen Wasserverbrauch pro Jahr etwa 4000 GWh Strom weniger liefern.

Wie stets bei der Abschätzung der Wirkung kommt es auch hier entscheidend auf die Geschwindigkeit der Klimaänderung an. Ist sie, wie bei fehlenden Eingriffen zur Eindämmung des Treibhauseffektes, hoch,

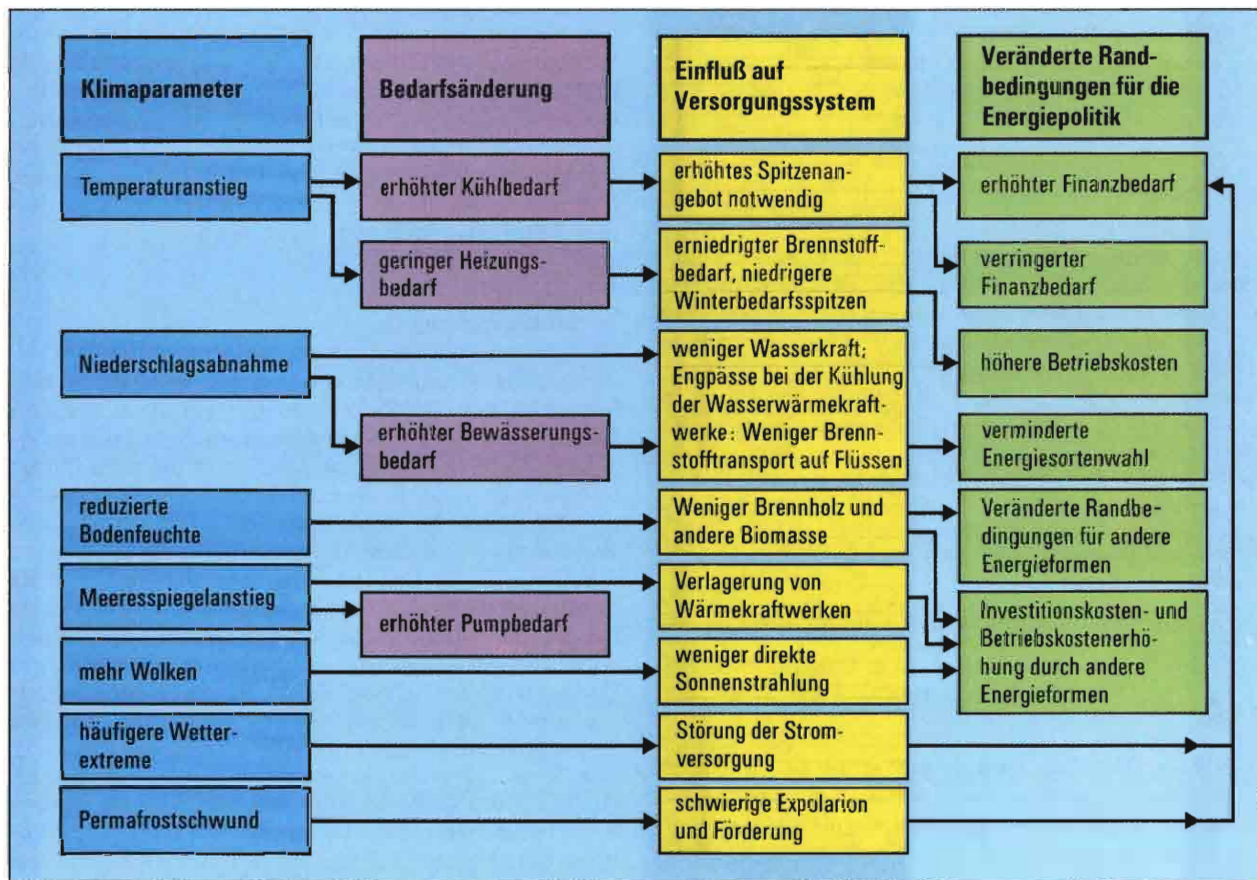


Abb. 7: Wirkung von Klimaänderungen auf Energiebedarf, Versorgung und Energiepolitik

sind die erzwungenen Anpassungen sehr kostspielig, denn existierende Anlagen müssen rasch umgerüstet oder ersetzt werden. Wird eingegriffen, dann ist bei dem damit notwendigen verstärkten Rückgriff auf Wasserkraft die wenigstens grobe Kenntnis der Niederschlagsänderungen Voraussetzung für erfolgreiches Handeln.

#### – Biomasse als Energieträger

Für viele Entwicklungsländer ist Energie aus Biomasse, zum Beispiel durch Verwendung von Brennholz zum Kochen, die wesentlichste Energieform. In afrikanischen Ländern liegt der Biomasseanteil an der Energieversorgung meist über 80 Prozent, in einigen sogar über 90 Prozent. Nimmt die Nettoprimärproduktion von Biomasse durch Klimaänderungen ab, sei es durch verminderte Bodenfeuchte oder Überschwemmung von Küstenzonen, dann wird der Ersatz der bisher oft kostenlosen Energiequelle durch teure andere Quellen sehr schwierig. Weil besonders die Länder mit semiaridem Klima und schon angespannter Versorgungslage betroffen sind, können schon sehr geringe Bodenfeuchteänderungen große Wirkung im positiven wie negativen Sinne haben. Der Ausweg wird zum Teil das Eindringen in anderweitig genutzte Gebiete, zum Beispiel Wälder, sein. Da die Effizienz bei der Verbrennung von Biomasse sehr stark gesteigert werden kann, sind fördernde Programme sehr wichtig.

### 3.10 Verkehr

Wetterereignisse können die Funktion der Verkehrssysteme empfindlich stören. Zur Abschätzung der Wirkung von Klimaänderungen auf den Verkehr, also auf den Transport von Personen und Gütern und den daraus resultierenden wirtschaftlichen und gesellschaftlichen Folgen gibt es aber kaum Untersuchungen. Lediglich aus Kanada, Großbritannien und den Vereinigten Staaten von Amerika, also hochentwickelten Ländern mittlerer Breiten, liegen einige Studienergebnisse vor.

Direkte Wirkungen bei erhöhtem Treibhauseffekt sind:

- weniger Behinderung durch Schnee und Eis;
- Behinderung der Schifffahrt bei höherem Meeresspiegel durch bedrohte Infrastruktur in Seehäfen;
- veränderte Fluß- und Seepiegel mit positiven wie negativen Folgen für die Fluß- und Seeschifffahrt sowie negativen für den Straßenverkehr bei Überschwemmungen

Die indirekten Folgen für den Verkehr bei emissionsmindernden Maßnahmen sind vor allem für Auto- und Flugverkehr weit gravierender als die direkten. Sie werden in Abschnitt E als Teil der Ergebnisse der Studienprogramme angesprochen.

#### – Straßenverkehr

Nach einer Studie zum Einfluß einer Klimaänderung auf den Straßenverkehr wären zum Beispiel in Ostka-

nada Hunderte von Millionen Dollar jeweils für Brücken und Überführungen sowie Straßen- und Eisenbahnen aufzuwenden, wenn das Klima sich, wie in 2 \* CO<sub>2</sub>-Modellen berechnet, verändert. In küstennahen, niedrig liegenden Gebieten müßten bei einem Meeresspiegelanstieg von einem Meter zum Beispiel in Florida, viele Brücken höher gelegt werden, um Sturmfluten als Folge der Wirbelstürme zu begegnen. Der Winterdienst für die Straßen wird in den Gebieten zurückgehen, die schon jetzt wenig Schneefall oder häufigen Wechsel zwischen Schneefall und Tauwetter haben, wohl aber nicht in Gebieten mit bisher länger anhaltender Schneebedeckung, denn besonders hoher Aufwand ist bei Temperaturen um 0°C notwendig. Das heißt aber auch, daß die Straßensicherheit in diesen Regionen geringer werden könnte.

#### – Flugverkehr

Regional könnte eine Temperaturerhöhung zu einer Verminderung der Behinderungen des Flugverkehrs durch Schnee und Eis führen. Ein weiterer Effekt höherer Temperaturen auf den Flugverkehr wird bislang kaum beachtet: Beim Start ist das maximale Startgewicht abhängig von der Dichte der Luft, die bei steigender Temperatur und steigendem Wasserdampfgehalt abnimmt, so daß schon heute Flugzeuge in heißen und feuchten tropischen Gebieten oder von hoch liegenden Gebieten aus mit geringerer Masse starten müssen als zum Beispiel in der Bundesrepublik Deutschland und somit die Frachtkosten steigen. Flughäfen, die am Meer liegen, wären auch von einem Meeresspiegelanstieg betroffen.

#### – Schiffsverkehr

Den positiven Aspekten verlängerter Schifffahrt in verlängerten eisfreien Zeitabschnitten für die nördlichen Regionen stehen die verminderten Schifffahrtsmöglichkeiten bei gesunkenen Wasserständen der Flüsse und Seen gegenüber. Speziell in Regionen, die das für die Schifffahrt in trockenen Sommern notwendige Wasser zum Teil oder überwiegend von Gletschern der Gebirge im Oberlauf bekommen, kann Erwärmung und fehlende Niederschlagszunahme das Ende für die Flußschifffahrt im Sommer bedeuten. Alle von Alpenflüssen gespeisten schiffbaren europäischen Flüsse, wie zum Beispiel Rhein, Po und Donau, könnten davon auch in keineswegs besonders warmen Sommern betroffen sein, vor allem wenn das Reservoir der Gletscher weiter so stark schrumpft wie bisher. Auch andere Gebiete, zum Beispiel das der großen Seen in Nordamerika, haben (vgl. Nr.3.5) bei Abflußberechnungen im 2 \* CO<sub>2</sub>-Gleichgewichtsklima mit reduzierten Wasserständen und somit behinderter Schifffahrt zu rechnen.

Die Seeschifffahrt wird von verminderter Meereisausdehnung und -stärke profitieren, hat aber mit hohem zusätzlichem Aufwand zum Schutz der Hafenanlagen bei steigendem Meeresspiegel zu rechnen. Sie wäre bei der als sehr wahrscheinlich angesehenen Zunahme von Zahl und Intensität der Wirbelstürme sowie der Ausweitung des betroffenen Gebietes noch stärker gefährdet als bisher.



## – Bahnverkehr

Einerseits werden in einigen Regionen Störungen durch Schneeverwehungen zurückgehen, andererseits ändert sich bei erhöhten Temperaturen die Ausdehnung der Gleise, was die Sicherheit beeinträchtigen würde.

Um eine befriedigende Abschätzung der Wirkungen von Klimaänderungen auf den Verkehrssektor zu bekommen, ist vor allem auch eine Untersuchung in Entwicklungsländern mit großen Schiffsstraßen notwendig. Zusätzlich müßten die Ergebnisse gekoppelter Ozean-Atmosphärenmodelle mit hydrologischen Modellen verknüpft werden, um zum Beispiel den Jahresgang des Wasserstandes vom Rhein und anderen europäischen Flüssen zu berechnen. Darüber hinaus ist abzuschätzen, welcher Aufwand zum Schutz der Hafenanlagen bei steigendem Meeresspiegel notwendig ist.

### 3.11 Industrie und Gewerbe

Klimaänderungen werden auch Auswirkungen auf die Produktion und den Handel von Waren und auf Dienstleistungen haben.

Die Industrie wird

- selbst von den veränderten Klimaparametern und damit den veränderten Wetterereignissen betroffen sein,
- aber auch auf veränderte Nachfrage nach Produkten und Dienstleistungen reagieren müssen,
- teilweise vom veränderten Angebot nachwachsender Rohstoffe abhängen,
- an Küsten Standorte wechseln müssen und
- sich auf die neuen Wetterextreme als Versicherer einstellen müssen.

In einer internen Studie des Britischen Wetterdienstes, ist die Wetterempfindlichkeit bestimmter Wirtschaftszweige als Verhältnis aus der Schwankung von Jahr zu Jahr und dem Durchschnittswert des Bruttoproduktionswertes für Großbritannien dargestellt worden. Demnach erreicht diese Maßzahl 30 Prozent für die Landwirtschaft, 20 Prozent für Verkehr und Kommunikation, 15 Prozent für das Baugewerbe, 10 Prozent für den Einzelhandel, 4,3 Prozent für Dienstleistungen, 3 Prozent für Verhüttung und Verfahrenstechnik, sowie nur 2 Prozent für staatlich gestützte Dienstleistungen. Auf andere Länder mit anderem Klima und anderer Industriestruktur sind diese Zahlen zwar nicht übertragbar, sie geben dennoch einen Einblick in die kräftige Abhängigkeit einzelner Wirtschaftszweige von Wetterereignissen. Weiterhin muß beachtet werden, daß bei Klimaänderungen mit notwendigerweise veränderter Extremwertstatistik in der Übergangphase noch höhere Abhängigkeit folgen würde. Eine Erhöhung der Oberflächentemperatur des Ozeans um nur 0,5°C könnte die Zeit mit Wirbelstürmen um 20 Tage verlängern und die Schäden durch Wirbelstürme um 40 Prozent erhöhen. Sicher wären davon die Fischindustrie und die Off-shore Öl- und Gasexploration betroffen. In höheren nördlichen

Breiten dagegen hätten letztere Vorteile wegen des Rückgangs von Meereis und Eisbergen.

Die Tourismusindustrie hängt zwar schon jetzt in jedem Jahr stark von den Wetterereignissen ab, auf lange Sicht aber noch stärker von Klimaänderungen. Beispiele für das erstere sind Ausfall der Skisaison in vielen Wintersportorten der Alpen im Winter 1989/1990 oder starker Rückgang der Urlauberzahlen an der Adria im Sommer 1989 wegen der außergewöhnlichen, vom Wetterablauf geförderten, Planktonblüte. Für einige kanadische Skiegebiete gibt es Abschätzungen der Veränderungen in einem 2 \* CO<sub>2</sub>- Gleichgewichtsklima. Dies würde die vollständige Aufgabe in Skiegebieten in Teilen Ontarios und stark verkürzte Saison in Gebieten Ontarios und Quebecs und nur wenig Verbesserung bei Produktion von Kunstschnee bedeuten (119).

Eine einfache Abschätzung mit aus der Meteorologie bekannten Maßzahlen und den erwarteten Temperaturänderungen soll die Bedeutung einer Erwärmung für die Wintersportindustrie in Gebirgen höherer mittlerer Breiten unterstreichen. Steigt die Temperatur im globalen Mittel um 1,5°C von heute bis zum Jahre 2035 bei mittlerer Empfindlichkeit des Klimasystems (vgl. Nr. 3.2: 3. Kapitel), so bedeutet das für das Winterhalbjahr besonders im Inneren der Kontinente noch größere Temperaturzunahmen. Schätzt man vorsichtig nach unten und oben ab, dann erhält man eine Spanne von 1,5 bis 3,0°C Erwärmung. Wählt man nur 1,5°C Erwärmung, so bedeutet das eine Anhebung der durchschnittlichen Schneefallgrenze um 200 Meter. Eine Anhebung um weniger als 150 Meter ist physikalisch nicht möglich, eine größere Anhebung kommt recht häufig besonders in inneralpinen Tälern vor. Da die höhere Erwärmung nicht weniger wahrscheinlich ist, muß aber auch eine mindestens doppelte Anhebung in Planungen einbezogen werden.

Einige Industrien wie zum Beispiel Nahrungsmittel-, Papier-, Fisch- und Aluminiumindustrie sind vom Angebot und Preis der Feldfrüchte, der Fische, des Holzes, des Wassers oder der Mineralien und Energiepreise am Ort stark abhängig. Die Folgen für die Landwirtschaft, die Forstwirtschaft und den Fischfang (vgl. Nr.3.3 bis 3.6) sind daher Eingabeparameter für die Abschätzung der Wirkung auf die verarbeitende Industrie. Die fehlende verlässliche Regionalisierung hat bisher verhindert, daß Auswirkungen veränderter Rohstoffmenge und Preise auf bestimmte Industriezweige auch nur annähernd für den Fall von Klimaänderungen abgeschätzt werden konnten. Die besonders gefährdeten Bereiche jedoch können angegeben werden: Es sind vor allem von einzelnen Nahrungsmitteln oder Naturrohstoffen wie Früchten, Fasern, Holzsorten und Fischen abhängige Industriezweige. Wie bei allen Klimaänderungen sind auch Teilaspekte, die menschliche Aktivitäten positiv beeinflussen, in allen Bereichen nicht auszuschließen (vgl. Nr.3.3 bis 3.6).

Die Variabilität der Klimaparameter, die alle Wetterextreme einschließt, ist der Hauptanlaß für die Versicherung vieler Werte gegen Naturgefahren. Weil dabei Zahlungen in Höhe von Milliarden DM schon bei einzelnen Stürmen anfallen, und vor allem hochentwickelte Länder mit hohen versicherten Werten be-

Tabelle 6

**Stürme der vergangenen Jahre und die verursachten Schäden (120)**

Jahr	Ereignis	Volkswirtschaftlicher Schaden in Mio. US\$	versicherte Schäden
1987	Sturm in Großbritannien und Frankreich	3 700	3 100
1988	Wirbelsturm Gilbert	2 350	830
1989	Wirbelsturm Hugo	9 000	4 500
1990	Winterstürme in Europa	25 000	17 000

troffen sind (vgl. Tabelle 6), gibt es bereits Abschätzungen über die Folgen bei vorgegebenen Klimaänderungen.

Die Abnahme der Schneesturmschäden bei Erwärmung wird nach einer Studie aus den Vereinigten Staaten durch die Zunahme der Schäden durch Wirbelstürme mehr als kompensiert. Lokale Stürme bei Gewittern und die versicherten Schäden nehmen um 300 Millionen US-Dollar pro Jahr in der Zeit von 1990 bis 2010 zu (121). Die Zunahme der Konvektion in der Atmosphäre, die zu erhöhter Intensität und Frequenz von Wirbelstürmen, Tornados, Hagelschlägen und Überschwemmungen führt, würde in der Versicherungswirtschaft zu erhöhten Prämien, erhöhter Selbstbeteiligung und Schadensobergrenzen führen (122). Anlaß für diese Überlegungen war nicht nur die von den Klimatologen vorhergesagte globale Erwärmung, sondern die während der vergangenen 20 Jahre extrem angestiegenen volkswirtschaftlichen und Versicherungsschäden als Folge einer Zunahme der Großkatastrophen (definiert als Ereignis mit Schäden über 100 Mio. US \$) um den Faktor 3 (123).

### 3.12 Gesundheit

Die Änderung der Klimabedingungen, insbesondere die zunehmende Häufigkeit von Wetterextremen, wird auch Auswirkungen auf die Gesundheit der Menschen haben. Todesfälle bei älteren Menschen oder als Folge von Herz-Kreislauf-Erkrankungen können deutlich in Zusammenhang mit der Jahreszeit und mit Wetterereignissen (Hitzewellen) gebracht werden (124). Es dürfte allerdings schwierig sein, den Einfluß eines geänderten Klimas von dem eines Wandels der Lebensweise (Ernährungsgewohnheiten, Verstädterung) abzugrenzen. Von Bedeutung für die Gesundheit ist vor allem eine erhöhte Luftverschmutzung. Höhere Temperatur und erhöhte UV-B-Strahlung in der Troposphäre bei vermindertem Ozongehalt der Stratosphäre beschleunigen photochemische Reaktionen. Das kann verbreitet, besonders aber in der Nähe von Ballungsgebieten, zu erhöhtem Gehalt von Oxidantien führen. Da diese Oxidantien, wie zum Beispiel Ozon (O<sub>3</sub>) und Peroxyazetylnitrat (PAN), die Gesundheit beeinträchtigen, zum Beispiel durch Augenentzündung, chronische Bronchitis und Bronchialasthma, kann die kombinierte Wirkung von zusätzlichem Treibhauseffekt und Ozonabbau in der Stratosphäre über beschleunigte chemische Umwandlungen zu einer wesentlich gesteigerten Luftbelastung in

Erbodennähe führen. Tierversuche deuten darauf hin, daß Ozon die Entwicklung von Lungentumoren fördert (125).

Menge und Qualität des Wassers sind in vielen Gebieten stark korreliert. Je geringer die Menge, um so geringer die Qualität, sei es durch erhöhten Salzgehalt, erhöhte Keimzahl oder die Überschreitung der Grenzwerte für toxische Substanzen. In Gebieten mit verminderter Bodenfeuchte und vermindertem Abfluß wird also Wasser nicht nur knapper als früher sondern ist auch von minderer Qualität. Speziell in semiariden Gebieten könnte das bei Klimaänderungen zu einem großen Problem werden. Aber auch in Gebieten mit häufigeren Überschwemmungen, zum Beispiel in Küstenzonen, ist die Wasserqualität und damit die Gesundheit der Menschen gefährdet.

Ein weiteres Problem könnte die Ausdehnung der Verbreitungszonen von Tieren übertragener Infektionskrankheiten wärmerer Regionen werden. Die Verbreitung von Krankheiten, wie zum Beispiel Malaria, ist im wesentlichen durch die Temperaturabhängigkeit der Überträger und Erreger an deren natürliches Verbreitungsgebiet gebunden. Das Verbreitungsgebiet wird mit zunehmender Temperatur vergrößert. Im Jahre 1987 war Malaria in Gebieten, in denen 2,2 Milliarden Menschen wohnten, verbreitet. Nach Angaben der Weltgesundheitsorganisation (126) könnten viele Krankheiten, zum Beispiel Malaria und Schistosomiasis, bei der vorhergesagten Erwärmung wieder oder neu in vielen Gebieten und Ländern auftreten.

### 3.13 Wanderungsbewegungen

Die Abwanderung aus bedrohten, überschwemmten oder ausgetrockneten Gebieten und die Neuansiedlung an zunächst sicherer Stelle, könnten die bedrohlichsten Folgen einer Klimaänderung sein. Menschen haben schon immer auf Naturkatastrophen und erschwerte Lebensbedingungen aufgrund von Klimaänderungen, wie dem Verlust des Hauses bei Überschwemmung, Nahrungs- oder Wasserwangel, Verlust der Einkommensmöglichkeit und der auf solche Ereignisse folgenden Zerstörung der (kulturellen) Gemeinschaft mit Flucht oder Abwanderung reagiert. Gerade in den Entwicklungsländern ist der Verlust landwirtschaftlicher Nutzfläche als Folge von Übernutzung, Degradierung der Böden und/oder Dürreperioden immer wieder Ursache von Flüchtlingsströmen. So hat als Folge der Dürre in der Sahel-Zone die

Cote d'Ivoire fast 4 Millionen Flüchtlinge aus den nördlichen Nachbarländern aufgenommen, was das Land angesichts einer eigenen Einwohnerzahl von nur etwa 11 Millionen, einer spürbaren Übernutzung der eigenen Boden- und Waldressourcen und einer Stagnation der Wirtschaft vor erhebliche Probleme stellt.

Umweltflüchtlinge, also Dürre und Übernutzung der Böden Vertriebene, werden in den Entwicklungsländern immer zahlreicher (127). Ihre Zahl beträgt nach Angaben der Weltgesundheitsorganisation heute bereits etwa 15 Millionen Menschen. Schon ein nur mäßiger Meeresspiegelanstieg von einigen Dezimetern würde in Entwicklungsländern weitere Millionen von Menschen vertreiben: zum Beispiel zwischen 10 und 15 Prozent der gesamten Bevölkerung der Länder Bangladesch und Ägypten bei einem Meeresspiegelanstieg von einem Meter, wenn wie bisher aus Geldmangel kein wesentlicher Küstenschutz betrieben werden kann. Die Wiederansiedlung verursacht ebenfalls große Probleme bei den Neuankömmlingen, aber auch den schon Ansässigen durch Nahrungs- und Wohnungsmangel, Infrastrukturschwächen in Städten, raschere Übertragung von ansteckenden Krankheiten, Einschleppung neuer Krankheiten. Sie vergrößert durch die psychische Anspannung nicht zuletzt die Anfälligkeit für Krankheiten.

Verschlechterte Umweltbedingungen sind nicht der einzige Grund für die Flucht oder Abwanderung, sondern gehen häufig einher mit wirtschaftlicher und politischer Instabilität.

In Industrieländern wären bei Klimaänderungen Wanderungsbewegungen eine Antwort bestimmter Bevölkerungsgruppen auf neue physikalische und soziale Rahmenbedingungen, Naturkatastrophen oder daraus resultierende Erwerbslosigkeit. Sie könnten aber auch Folge einer politischen Entscheidung, Teile der Küstenzone nicht vor Überschwemmung zu schützen, damit wichtigere Küstenzonen effektiv geschützt werden können, sein.

Eine Zunahme der Zahl der Umweltflüchtlinge, etwa aus den Küstenregionen und den semiariden Gebieten der Entwicklungsländer, könnte auch zu einem verstärkten Flüchtlingsstrom in die Industrieländer führen.

#### 4. Literaturverzeichnis

1. Stouffer, R.J. u. a.: Interhemispheric asymetry in climate response due to a gradual increase in atmospheric CO<sub>2</sub>. Nature Band 342, 1989, S. 660-662
2. Ramanathan, V. u. a.: Climate chemical interactions and effects of Changing atmospheric trace gases. Rev. Geophysics Band 25, 1987, S. 1441-1482
3. Raval, A.; Ramanathan, V.: Observational determination of the greenhouse effect. Nature Band 342, 1989, S. 758-761
4. Mitchell, J.F.B.: The greenhouse effect and climate change. Rev. Geophysics Band 27, 1989, S. 115-139
5. Wilson, C.A.; Mitchell J.F.B.: A doubled CO<sub>2</sub> climate sensitivity experiment with a global climate model including a simple ocean. J. Geophys. Res. Band 92, 1987, S. 13315-13343
6. modifiziert nach Cess, R.D. u. a.: Interpretation of Cloud-Climate Feedback as Produced by 14 Atmospheric General Circulation Models. Science Band 245, 1989, S. 513-516
7. Ramanathan, V. u. a.: Cloud-radiative forcing and climate: results from the Earth radiation budget experiment. Science Band 243, 1989, S. 57-63
8. WMO/UNEP: Scientific Assessment of Climate Change. in: Report of Working Group I of the Intergovernmental Panel On Climatic Changes (IPCC), Genf, 1990
9. Stouffer u. a. 1989
10. Washington, W.M.; Meehl, G.A.: Climate sensitivity due to increased CO<sub>2</sub>: experiments with a coupled atmosphere and ocean general circulation model. Climate Dynamics Band 4, 1989, S. 1-38
- Manabe, S.; Bryan, K.; Spelman, M.: Transient response of a global ocean-atmosphere model to a doubling of atmospheric carbon dioxide. J Geophys. Res., 1989
- Sausen, R.; Lunkeit, F.; Oberhuber, J.M.: Transient CO<sub>2</sub>-experiment with a coupled atmosphere-ocean-model (ECHAM + OPYC). Boer, G.J. (Hrsg.): Research activities in atmospheric and oceanic modelling. CAS/JSC Working group on Numerical experimentation. WMO Report, 1990 im Druck
- Cubash, U.E.; Santer, B.D.; Maier-Reimer, E.; Mikolajewicz, U.; Höck, H.: Simulation of the transient CO<sub>2</sub> greenhouse effect with a coupled ocean-atmosphere model (ECHAM 1 + LSG). Boer, G.J. (Hrsg.): Research activities in atmospheric and oceanic modelling. CAS/JSC Working group on Numerical experimentation. WMO Report, 1990, im Druck
11. WMO/UNEP 1990
12. WMO/UNEP 1990
13. WMO/UNEP 1990
14. WMO/UNEP 1990
15. Cubasch u. a. 1990
- Sausen u. a. 1990
- Manabe, S.; Bryan, K.; Spelman M.D.: Transient response of a global ocean atmosphere model to a doubling of atmospheric carbon dioxide. J. Phys. Oceanogr., im Druck, 1990
16. Hansen, J., u. a.: Global climate changes as forecast by GISS's three dimensional model. J. Geophys. Res. Band 93, 1988, S. 9341-9364
- Rind, D.; Goldberg R.; Ruedy R.: Change in climate variability in the 21st century. Climate Change Band 14, 1989, S. 5-37
17. Emanuel, K.A.: The dependence of hurricane intensity on climate. Nature Band 326, 1987, S. 483-485
18. nach Emanuel, 1987
19. nach Sausen u. a. 1990
20. nach Sausen u. a. 1990
21. nach Sausen u. a. 1990
- Stouffer u. a. 1990
- Washington und Meehl 1989
- Cubasch u. a. 1990
22. Stouffer u. a. 1989
23. nach Cubasch 1990
24. nach Mikolajewicz, U.: Berichte des Max-Planck-Instituts, Nr. 49, 1990

25. Enquete-Kommission „Vorsorge zum Schutz der Erdatmosphäre“: Schutz der tropischen Wälder. Eine internationale Schwerpunktaufgabe. In: Zur Sache, Themen parlamentarischer Beratung, Deutscher Bundestag, 1990
- Nobre, C.; Shukla, J.; Sellers P.: Climatic impact of Amazon Deforestation. Science, im Druck, 1990
- Lean, J.; Warrilow, D. A.: Simulation of the regional impact of Amazon deforestation. Nature Band 342, 1989, S. 411-413
26. Wilson und Mitchell 1987
27. Sausen, R.; Barthels R.K.; Hasselmann, K.: Coupled ocean-atmosphere models with flux correction. Climate Dynamics Band 2, 1988, S. 154-163
28. Oberhuber u. a. 1990
29. Anisimov O.A.: An assessment of permafrost sensitivity to changes in the global thermal regime of the land surface. Meteorology and Hydrology, 1989, S. 79-84
30. Washington und Meehl 1989
- Mitchell, J.F.B.; Warrilow, D.: Summer dryness in Northern midlatitudes due to increased CO<sub>2</sub>. Nature, 330, 1987, S. 238-240
31. Hansen u. a. 1988
32. Hansen u. a. 1988
33. Enquete Kommission „Vorsorge zum Schutz der Erdatmosphäre“, 1990
- Stouffer u. a. 1989
34. Mikolajevicz 1990
35. Lean und Warrilow 1989
36. WMO/UNEP 1990
37. Tolbert, D.T. und Zelitch I.: Carbon metabolism in CO<sub>2</sub> and plants: The response of plants to rising levels of atmospheric carbon dioxide. in: Lemon (Hrsg.) Westview Press, 1983, Boulder
38. Oechel, W.C. und Strain, B.R.: Native species responses. in: Direct-Effects of Carbon Dioxide on Vegetation. Strain und Cure, US-DOE, Carbon Dioxide Research Division (Hrsg.), Washington, D.C., 1985
39. Feary und Bjerkmann 1983
40. Easmus, D. und Jarvis, P.G.: Direct effects of CO<sub>2</sub> increases on trees and forests (natural and commercial) in the UK. Adv. Ecol. Res., 1989
41. Anthon, J.S.: The role of maintenance respiration in plant growth. Plant Cell Environment, 7, 1984, S. 561-569
42. Parton, W.J.; Schinnel, D.S., Cole, C.V. und Ojima D.S.: Analysis of factors controlling soil organic matter levels in Great Plains grasslands. Soil Science Society of America Journal, 51, 1987, S. 1173-1179
43. Billings, W.D.; Luken, J.O.; Martensen, D.A. und Peterson, K.M.: Arctic tundra: a sink or source for atmospheric carbon dioxide in a changing environment?. Oecologia, 53, 1982, S. 7-11
- Billings, W.D.: Increasing atmospheric carbon dioxide: possible effects on arctic tundra. Oecologia, 58, 1983, S. 286-289
- Billings, W.D.; Peterson K.M.; Luken, J.D. und Mortensen, D.A.: Interaction of increasing atmospheric carbon dioxide and soil nitrogen on the carbon balance of tundra microcosms. Oecologia, 65, 1984, S. 26-29
44. Oechel, W.C. und Riechers, G.H.: Impacts of increasing CO<sub>2</sub> on natural vegetation, particularly tundra; in: Climate-Vegetation Interactions; Rosenzweig und Drekinson (Hrsgs.); UCAR Report, OIES-2, Boulder, 1986
- Oberbauer, S.F.; Sionit, N; Hastings, S.J. und Oechel, W.C.: Effects of CO<sub>2</sub> enrichment and nutrition on growth, photosynthesis and nutrient concentration of Alaskan tundra plant species. Canadian J. of Botany, 64, 1986, S. 2993-2998
- Grulke, N.E. u. a.: Carbon balance in tussock tundra under ambient and elevated atmospheric CO<sub>2</sub>. Oecologia, 1986
45. Flohn, H.; Kapala, A.; Knoche, H.R. und Möchel, H.: Recent changes of the tropical water and energy budget and of mid-latitude circulations. Climate Dynamics, 5, 1990
46. Tans, P.P.; Conway, T.J. und Nakasawa, T.: Latitudinal distribution of sources and sinks of atmospheric carbon dioxide. J. Geophys. Res., 94, 1989, S. 5151-5172
47. Kullmann, L.: Past and present tree lines of different species in the Hondolan Valley, Central Sweden. in: Tree Line Ecology; Morisset und Payette (Hrsgs.), Centre d'Etudes Nordiques de l'Université Laval, Quebec, Canada, 1983
48. Van Devender, T.R. und Spaulding, W.G.: Development of vegetation and climate in the southwestern United States. Science, 204, 1979, S. 701-710
49. Emanuel, W.R.; Shugart, H.H. und Stevenson M.P.: Climate change and the broadscale distribution of terrestrial ecosystem complexes. Climate Change, 7, 1985, S. 29-43
- Solomon, A.M.: Transient response of forests to CO<sub>2</sub>-induced climate change: simulation modeling experiments in Eastern North America. Oecologia, 68, 1986, S. 567-579
50. Liehne, P.F.S.: Climatic influences on mosquito-borne diseases in Australia. in: Greenhouse: Planning for Climate Change; Pearnian (Hrsg.), CSIRO, Melbourne, 1985
51. Le Houeron, H.N.: Pastoralism; in Climate Impact Assessment; Kater, Ausubel und Berberian (Hrsgs.); Wiley, Chichester, 1985
52. Le Houeron, H.N.: Global change: population, landuse and vegetation in the Mediterranean basin by the mid 21st century. European Conference on landscape Ecological Impact of Climate Change, 3-7 December 1989, Lunteren, Niederlande, 1989
53. Farber, S. und Costanza, R.: The economic value of wetland systems. J. of Environm. Management, 24, 1986, S. 41-51
54. Broecker und Denton, zitiert in: Abschlußbericht von Working Group I, International Panel on Climatic Changes, 1990
55. Gulliksen und Lonne, zitiert in: Abschlußbericht von Working Group I, International Panel on Climatic Changes, 1990
56. IPCC WG 2: Bericht der Arbeitsgruppe „Impacts“ an das Intergovernmental Panel on Climate Change, WMO/UNEP, Genf, 1990
57. Dickson u. a. 1988
58. Barber, R.T. und Chavez, F.P.: Biological Consequences of El Nino. Science, 222, 1983, S. 1203-1210
59. Food and Agriculture Organisation of the United Nations (FAO): Land, Food and People. Rom, 96 Seiten, 1984
60. WMO/UNEP 1990
61. Internationaler Weizenrat: 10th of July 1989, Market Report, London, 1989
62. Sausen u. a. 1990
63. Pearcy, R.W. und Bjorkman, O.: Physiological Effects, CO<sub>2</sub> and Plants: The Response of Plants to Rising levels of Atmospheric CO<sub>2</sub>; Lemon (Hrsg.), Westview Press, Boulder, Cplorado, 1983

- Kimball, B.A.: Carbon dioxide and agricultural yield: An assemblage and analyses of 770 prior observations, Water Conservation Laboratory. Report No. 14, USDA Agricultural Research Service, Phoenix, Arizona, 1983
64. Morison, J.I.L.: Plant growth in increased atmospheric CO<sub>2</sub>. in: „Carbon Dioxide and other Greenhouse Gases: Climatic and Associated Impacts“. Fantechi und Ghazi (Hrsgs.), Khuver, Dordrecht, 1989
65. Morrison 1989
66. Heck, W.W. u. a.: Assessment of crop loss from ozone. J. of Air Pollution Control Association, 31, 1982, S. 353-361
67. Parry, M.L.; Carter, T.R. und Porter, J.H.: The Greenhouse Effect and the Future of UK Agriculture. J. Roy. Agric. Soc. of England, 1989, S. 120-131
68. Salinger, M.J. u. a.: CO<sub>2</sub> and Climate Change. Impacts on Agriculture. New Zealand Met Service, Wellington, New Zealand, 1989
69. Hansen u. a. 1988
70. WMO/UNEP 1990
71. EPA: The potential Effects of Global Climate Change on the United States, Report to Congress, 1989
72. Pedgley, D.E.: Weather and the current desert locust plague. Weather, 44, 1989, S. 168-171
73. United Nations Environmental Programm (UNEP): Criteria for Assessing Vulnerability to Sea level Rise: A Global Inventory to High Risk Areas; UNEP und Regierung der Niederlande, Entwurf, 1989
74. EPA 1989
75. Brown, L.R.: Zur Lage der Welt 89/90, World-Watch Institute Report, S. Fischer, Frankfurt, 1990
76. Brown 1990
77. Brown 1990
78. Parry, M.L. und Carter, T.R.: The Assessments of the Effects of Climatic Variations Agriculture Aims, Methods and Summary of Results. in: Climatic Variations on Agriculture, Volume 1; Parry, Carter, Konijn (Hrsgs.); Kluwer, Dordrecht, 1988
79. Jarvis, P.G.: Atmospheric carbon dioxide and Forests. Phil. R. Soc. B., 324, 1989, S. 369-392
80. Peck, T.: The world perspective. in: Forest Policy: A contribution to resource development. Hummel, Martinus (Hrsgs.), Nijhoff Publishers, Den Haag, 1984
81. Binkley, C.S.: A case study of the effects of CO<sub>2</sub> induced climatic warming on forest growth and the forest sector. in: The Impact of Climatic Variations on Agriculture, Volume 1. Parry, Carter, Konijn (Hrsgs.); Reidel, Dordrecht, 1988
82. Wheaton, E.E. u. a.: An Exploration and Assessment of the Implications of Climatic Change for the Boreal Forest and Forestry Economies, Saskatchewan Research Council, Saskatoon, Saskatchewan, 282 Seiten, 1987
83. Sargent, N.E.: Redistribution of the Canadian boreal forest under a warmed climate. Climatological Bulletin, 20, 1988, S. 23-24
84. Smith, J.B. und Tirpak, D.A.: The potential Effects of Global Climate Change on the United States. Report to Congress, Volume 2: National Studies, EPA, Washington, 1988
85. Lotter und Zbinden 1989
86. Dansgaard und Oeschger 1988
87. Solomon 1986
88. Hansen u. a. 1988
89. Shiklomanov, I.A.: Anthropogenic change of climate, water, resources and water management problems. Conference on Climate and Water, Helsinki, Volume 2, 1988, S. 310-447
90. Stakliv, E.Z. und Lins, H.: Impacts of climate change on US water resources, Bericht für IPCC Arbeitsgruppe 2, 1989
91. Gleick, P.H.: Climate change hydrology and water resources, eingereicht bei: Review of Geophysics, 1989
92. Sanderson, M. und Wang, L.L.: Climate change and Great Lakes water levels. JAHSV Publ. No., 168, 1987, S. 477-487
93. Ojo, O.: Rainfall trends in West Africa 1901-1985. JAHS Publ. No., 168, 1987, S. 37-43
94. Sirconlon, J.H.A.: Variation des debits des cours d'eau, des niveaux des lacs en Afrique de l'ouest depuis le debut du 20 ème siècle. JAHS Publ. No., 168, 1987, S. 13-25
95. Smith, J.B. und Tirpak, D.A.: The potential Effects of Global Climate Change on the United States. US EPA, 1989
96. IPCC 1990
97. Bultot, F. und Gellens, D.: Simulation of the impact of CO<sub>2</sub> atmospheric doubling on precipitation and evapotranspiration – study of the sensitivity to various hypotheses. Conf. Climate and Water. Helsinki, Vol 1, 1989, S. 73-92
98. Thomsen: The effect of climate variability and change on groundwater in Europe. Conf. on Climate and Water, Helsinki. Vol. 1, 1989, S. 486-500
99. Länderarbeitsgemeinschaft Wasser (LAWA): Grundlagen für die Beurteilung der Wärmebelastungen von Gewässern. 2. Aufl., 123 Seiten, Mainz (Krach), 1977
100. Troadec, J.P.: Report of the Climate and Fisheries Workshop. Glantz (Hrsg.), NCAR, 1989, S. 7-8 und 16
101. Dickson, C.; Meincke, J.; Malmberg, R. und Lee, G.: The great salinity anomaly in the Northern North Atlantic. Progr. Oceanography, 20, 1984, S. 2
102. Manabe u. a. 1989
103. Caviedes, C.: Report of the Climate and Fisheries Workshop. H. Glantz (Hrsg.), NCAR, Boulder Colorado, 1989
104. Lewis, J.: The implications of Sea level Rise for Island and Low-Lying Countries. Report for Commonwealth Secretariat, 1988
105. Broadus, J.M.; Millman, J.D.; Edwards, S.F.; Aubrey, D.G. und Gable, F.: Rising Sea level and Damming of Rivers: Possible Effects in Egypt and Bangladesh. in: Effects of Changes in Stratospheric Ozone and Global Climate. Titus (Hrsg.), EPA und UNEP, Washington, D.C., 1986
106. Commonwealth Secretariat: Climate Change: Meeting the Challenge. Report by a Commonwealth group of Experts, London, 1989
107. Delft Hydraulics Laboratory: Sea level rise: a world-wide cost estimate of basic control defence measures. Bericht an IPCC, 1990
108. Titus, J.G.: Greenhouse Effect, Sea Level Rise and Barrier Islands. Management, 1990, S. 18
109. Mansfield, T. und Nishioka, S.: An Assessment of the Research on the Effects of a Rise in Sea Level by the Relevant Japanese Ministries. Bericht an IPCC, WG II. 1986
110. Hull, C.H.J. und Titus, J.G.: Greenhouse Effect, Sea Level Rise and Salinity in the Delaware Estuary. EPA, Washington, D.C., 1986
111. Commonwealth Secretariat 1989
112. Rijkswaterstaat: A Global Survey of Coastal Wetlands, their Functions and Threats in Relation to Adoptive Re-

sponses to Sea Level Rise. Bericht für IPCC Arbeitsgruppe 3, Bericht No. GWWS-90, 1990

113. Bird, E.C.F.: Shoreline Changes during the Past Century: Proceedings 23rd International Geographical Congress, Moskau, Pergamon Press, New York, 1976
114. May, S. Dolam, R. und Haydens B.: Erosion of US-Shorelines. EOS, 64, 1983, S. 551-552
115. Commonwealth Secretariat 1989
116. Sughandly, A.: Preliminary Findings on Potential Impact of Climate Change in Indonesia. Bericht an IPCC, Arbeitsgruppe 2 im September 1989; Tsukuba, Japan, 1989
117. Münchner Rückversicherung: Das Risiko einer Klimaänderung aus der Sicht der MR. Vortrag von Klaus Konrad, Mitglied des Vorstands der MR am 11.07.1990, 1989
118. Smith und Tirpark 1988
119. Wall, G.: Implications of Climatic Change for Tourism and Recreation in Ontario. Environment Canada, CCD 88-05, Downsview, Ontario Canada, 1988
- Lamothe, und Periard: Ontario, Implications of Climate Change for Canada down hill skiing in Quebec. Environment Canada, CCD 88-03, Downsview, Ontario, Canada, 1988
120. Münchner Rückversicherung 1990
121. Friedman, D.G.: Implications of Climate Change for the Insurance Industry. in: Coping with Climate Change, Topping Jr. (Hrsg.), Climate Institute, Washington, D.C., 1989
- Peele, B.D.: Insurance and the greenhouse effect. in: Greenhouse: Planning for Climate Change. Pearman (Hrsg.), CSIRO Publications, East Melbourne, Australia, 1988
122. Berz, G.: Klimaänderung: Auswirkungen auf Volkswirtschaft und Versicherungswesen. GR 42, 1990, S. 334-339
123. Berz 1990
124. Moniyama, M. und Katayama, K.: Deseasonalization of mortality in the world. Int. J. Biometeorology, 16, 1972, S. 329-342
- Kalkstein, L.S.: Potential Impact of Global Warming: Changes in Mortality from Extreme Heat and Cold. in: Coping with Climate Change. Topping, Jr. (Hrsg.), Climate Institute, Washington, D.C., 1989
125. Last, J.A.; Warren, D.L.; Pecquet-Goad, E. und Witsohl, H.P.: Modification of lung tumor development in mice by ozone. J. National Cancer Institute, 78, 1987, S. 149-154
126. Dobson, A.: Climate Change and Parasitic Diseases of Man and Domestic Livestock in the United States. in: Coping with Climate Change. Topping, Jr. (Hrsg.), Climate Institute, Washington, D.C., 1989
127. Tickel, Sir Crispin: Environmental Refugees. National Environment Research Council, Annual Lecture, Royal Society, London, Großbritannien, 1989
- Jacobsen, J.I.: Abandoning Homelands. in: State of the World. Worldwatch Institute, Washington, D.C., 1989

## 5. Tabellenverzeichnis

- Tabelle 1  
Treibhauseffekt im einfachsten aller Klimamodelle.
- Tabelle 2  
Der Anstieg des Meeresspiegels bis zum Jahre 2100 als Folge einer globalen Erwärmung
- Tabelle 3  
Nettoprimärproduktion (NPP) und lebende Biomasse in den wichtigsten Ökosystemen; Schätzungen aus).
- Tabelle 4  
Waldflächenanteil verschiedener Regionen.
- Tabelle 5  
Holzaufkommen in wichtigen Gebieten, unterteilt in Rundholz, Papierholz und Brennholz sowie in Nadelholz und andere Hölzer für die beiden ersten Nutzungsarten.
- Tabelle 6  
Stürme der vergangenen Jahre und die verursachten Schäden.

## 6. Abbildungsverzeichnis

- Abb. 1: Empfindlichkeitsparameter von 17 allgemeinen Zirkulationsmodellen der Atmosphäre pro m<sup>2</sup>. Er gibt an, um wieviel Grad die Temperatur steigt, wenn die Strahlungsbilanz um 1 W zunimmt. Offene Kreise gelten für nicht bewölkte Teile, geschlossene zeigen den globalen Wert mit Einschluß bewölkter Gebiete.
- Abb. 2: Meeresspiegelanstieg auch nach vollständigem Emissionsstopp im Jahre 2030.
- Abb. 3: Tiefster möglicher Kerndruck in einem Wirbelsturm a. für heutiges Klima und b. bei verdoppeltem äquivalentem CO<sub>2</sub>-Gehalt. Die beobachteten Werte sind in a. zum Vergleich eingetragen;
- Abb. 4: Zonal gemittelte Temperatur und Erwärmung im Szenario mit Verdoppelung des CO<sub>2</sub>-Gehaltes in der Atmosphäre a. berechnete zonal gemittelte Temperaturverteilung in der Atmosphäre und b. zonal gemittelte Temperaturänderung im dritten Jahrzehnt nach der CO<sub>2</sub>-Verdoppelung im gekoppelten Hamburger Klimamodell.
- Abb. 5: Änderung der Jahresmitteltemperatur an der Oberfläche in einem gekoppelten Ozeanatmosphärenmodell für die letzten zehn Jahre einer Koppelung über dreißig Jahre bei spontaner CO<sub>2</sub>-Verdoppelung.
- Abb. 6: Änderung des Meeresspiegels verschiedener Regionen durch Ausdehnung des Meerwassers bei vorgegebener Erwärmung für den Fall verdoppelten CO<sub>2</sub>-Gehaltes.
- Abb. 7: Wirkung von Klimaänderungen auf Energiebedarf, Versorgung und Energiepolitik

## 4. KAPITEL

## Die Wirksamkeit der von der Enquete-Kommission empfohlenen Maßnahmen

## 1. Emissionsszenarien

Emissionsszenarien bilden die Grundlage zur Abschätzung unterschiedlicher zukünftiger Konzentrations- und Klimaentwicklungen. Die Enquete-Kommission (EK) hat acht Szenarien entwickelt, nämlich vier zur FCKW-Reduktion (vgl. Tab. 1) und vier zur FCKW- und CO<sub>2</sub>-Reduktion (vgl. Tab. 2). Die FCKW-Szenarien dienen in diesem Kapitel dazu, die Konzentrations- und Temperaturänderungen abzuschätzen. Nach den Szenarien der Kommission wird noch ein kurzer Überblick über die IPCC-Szenarien und die MPI-Szenarien (Max-Planck Institut für Chemie in Mainz) gegeben, die in die Betrachtungen der Kommission mit einbezogen worden sind.

## 1.1 EK-Szenarien zur FCKW-Reduktion

## 1.1.1 EK-Szenario London

Dieses Szenario basiert auf den neuen Vereinbarungen über das Montrealer Protokoll während der 2. Vertragsstaatenkonferenz in London, die im Juni 1990 unter Einschluß von Ausnahmeregelungen beschlossen wurden. Geregelt werden jetzt fünf ver-

schiedene Stoffgruppen mit unterschiedlichen Reduktionsplänen. Der Stichtag für den Beginn der Reduktion wurde vom 1. 7. auf den 1. 1. eines Jahres vorverlegt. Wie bisher beziehen sich die Reduktionen auf Produktion und Verbrauch. Folgende Ausnahmeregelungen des Montrealer Protokolls wurden beibehalten: Alle Industrieländer können alle Reduktionsstufen um 10 Prozent, die jeweils letzte Stufe um 15 Prozent überschreiten, wenn dies zur Deckung des Bedarfs der Entwicklungsländer geschieht. Die Entwicklungsländer können ihre Reduktionsverpflichtungen um zehn Jahre hinausschieben.

Von diesen Ausnahmeregelungen leitet sich der in Tabelle 3 zusammengestellte Reduktionsplan für die FCKW und die Halone ab. Abbildung 1 zeigt, in welchem Maße die Produktionsmengen der einzelnen Substanzen in den festgelegten Zeitperioden zurückgehen sollen. Keiner der möglichen Ersatzstoffe fällt bisher unter die Regelungen. Die Entwicklung beim H-FCKW 22 wurde von dem IPCC-Szenario Cr übernommen.

Die energiebedingten CO<sub>2</sub>-Emissionen sowie die Emissionen von CH<sub>4</sub> und N<sub>2</sub>O folgen den Vorgaben des IPCC-Szenario BAU (business-as-usual) (vgl.

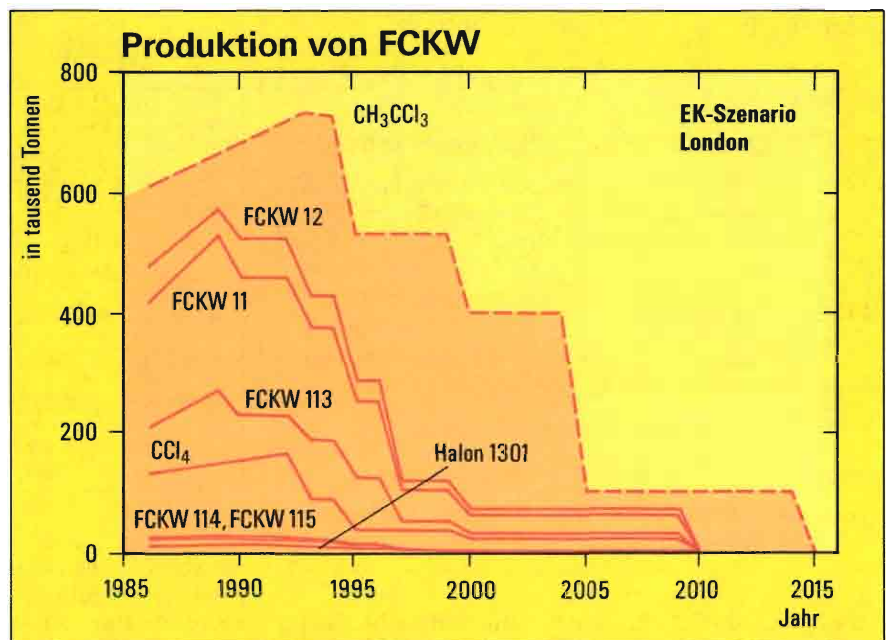


Abb. 1: Globale FCKW-Produktion nach dem Montrealer Protokoll in der Fassung der 2. Vertragsstaatenkonferenz von London (1990) mit Ausnahmeregelungen. Produktions-Ausstieg: 2010 (2015) (3).

Tabelle 1

### Übersicht über die Szenarien der Enquete-Kommission zur FCKW-Reduktion

#### EK-Szenario London

- FCKW nach Montrealer Protokoll *mit* Inanspruchnahme der auf der 2. Vertragsstaatenkonferenz 1990 in London vereinbarten Ausnahmeregelungen
- H-FCKW 22 nach IPCC-Szenario Cr
- CO<sub>2</sub> Energie nach IPCC-Szenario BAU (business-as-usual)
- CO<sub>2</sub> Tropenwald nach einem EK-Vernichtungsszenario
- CH<sub>4</sub> und N<sub>2</sub>O nach IPCC-Szenario BAU

*Test: Die Wirkung des Status-quo mit FCKW-Ausstieg bis 2010/2015*

#### EK-Szenario Washington

- FCKW wie EK-Szenario London; Ausstieg: 2010/2015
- H-FCKW 22; Ausstieg: 2040
- CO<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub> und N<sub>2</sub>O wie EK-Szenario London

*Test: Die Wirkung des H-FCKW 22-Ausstiegs bis 2040*

#### EK-Szenario Bonn

- FCKW nach Montrealer Protokoll *ohne* Inanspruchnahme der 1990 auf der 2. Vertragsstaatenkonferenz von London erlaubten Ausnahmeregelungen (AR) mit beschleunigten Ausstiegspänen für die Bundesrepublik Deutschland: 1995; die EG: 1997; die Welt: 2000
- H-FCKW 22 mit beschleunigtem Ausstieg: 2005
- CO<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub> und N<sub>2</sub>O wie EK-Szenario London

*Test: Die Wirkung von verschärften und beschleunigten Ausstiegspänen für FCKW bis 2000 und H-FCKW 22 bis 2005*

#### EK-Szenario Brasilia

- FCKW nach EK-Szenario Bonn mit beschleunigtem Ausstieg für die Welt bis Ende 1997
- H-FCKW 22 nach EK-Szenario Bonn
- CO<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub>, N<sub>2</sub>O wie EK-Szenario London

*Test: Die Wirkung des beschleunigten weltweiten FCKW-Ausstiegs bis 1997*

Tabelle 2

### Übersicht über die Szenarien der Enquete-Kommission zur FCKW- und CO<sub>2</sub>-Reduktion

#### EK-Szenario A

- CO<sub>2</sub> Energie nach IPCC-Szenario BAU (business-as-usual)
- CO<sub>2</sub> Tropenwald nach dem Vernichtungsszenario in EK-Szenario London
- CH<sub>4</sub> und N<sub>2</sub>O nach IPCC-Szenario BAU
- FCKW nach EK-Szenario London (Tabelle 1)
- H-FCKW 22 nach EK-Szenario Washington (Tabelle 1)

*Test: Die Wirkung des Status quo*

#### EK-Szenario B

- CO<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub> und N<sub>2</sub>O wie EK-Szenario A
- FCKW nach Montrealer Protokoll ohne Inanspruchnahme der 1990 auf der 2. Vertragsstaatenkonferenz in London vereinbarten Ausnahmeregelungen mit verschärften Ausstiegspänen für die Bundesrepublik Deutschland, die EG und die Welt nach EK-Szenario Bonn (Tabelle 1)
- H-FCKW 22 nach EK-Szenario Bonn (Tabelle 1)

*Test: Die Wirkung einer verschärften FCKW- und H-FCKW-Kontrolle*

#### EK-Szenario C

- CO<sub>2</sub> Energie, CH<sub>4</sub> und N<sub>2</sub>O wie EK-Szenario A
- CO<sub>2</sub> Tropenwald-Rettung nach 2. EK-Bericht
- FCKW und H-FCKW 22 nach EK-Szenario B

*Test: Die Wirkung von Maßnahmen zur Rettung des Tropenwalds*

#### EK-Szenario D

- CO<sub>2</sub> Energie nach EK-Empfehlungen, unterteilt nach Ländergruppen
- CO<sub>2</sub> Tropenwald-Rettung nach EK-Szenario C
- CH<sub>4</sub> und N<sub>2</sub>O nach EK-Szenario A
- FCKW und H-FCKW 22 nach EK-Szenario B

*Test: Die Wirkung von FCKW- und CO<sub>2</sub>-Kontrollmaßnahmen*

Nr. 1.3). Für die CO<sub>2</sub>-Emissionen durch die Abholzung der tropischen Wälder wurde ein Szenario aufgestellt, in dem die Rodungsraten zwischen denen der beiden Szenarien des 2. Berichts der Enquete-Kommission liegen (1). In diesem Szenario nimmt die globale Tro-

penwaldfläche von etwa 18 Millionen km<sup>2</sup> im Jahre 1990 bis zur vollständigen Vernichtung im Jahre 2100 stetig ab. Der CO<sub>2</sub>-Ausstoß erreicht bei Anhalten der vergangenen Trends im Jahre 1990 einen Wert von 2,40 Milliarden Tonnen Kohlenstoff. Bis 2100 nimmt die Emission auf 1,45 Milliarden Tonnen Kohlenstoff ab. Durch die Vernichtung von einem Quadratkilome-



Tabelle 3

**Reduktionsplan für FCKW und Halone –  
Vereinbarungen mit Ausnahmeregelungen**

Die Zahlen gelten für die Vereinbarungen des  
Montrealer Protokolls in der Fassung der  
2. Vertragsstaatenkonferenz von London  
mit Inanspruchnahme der Ausnahmeregelungen

Basis- jahr Jahr (jeweils 1.1.)	Reduktion in Prozent für die Stoffgruppen <sup>5)</sup>			
	Gruppe 1 <sup>1)</sup> 1986	Gruppe 3 <sup>2)</sup> 1986	Gruppe 4 <sup>3)</sup> 1989	Gruppe 5 <sup>4)</sup> 1989
1990	+ 10			
1992		+ 10		
1993	- 10		- 40	+ 10
1995	- 40	- 40	- 75	- 20
1997	- 75			
2000	- 85	- 85	- 85	- 40
2005				- 85
2010	-100	-100	-100	
2015				-100

- 1) Hierzu gehören die vollhalogenierten FCKW 11, 12, 113, 114 und 115 mit Wachstumsraten pro Jahr bis 1990 von 9%, 7%, 10%, 6% und 6%.
- 2) Hierzu gehören die Halone 1211, 1301 und 2402 (ausgenommen von diesem Plan sind „essential uses“, auf die sich die Staaten ab 1. Januar 1993 einigen müssen); hier aber nur H-1301 betrachtet mit einer Wachstumsrate von 6 Prozent pro Jahr bis 1992.
- 3) Hierzu gehört CCl<sub>4</sub> mit einer Wachstumsrate von 4 Prozent pro Jahr bis 1993.
- 4) Hierzu gehört CH<sub>3</sub>CCl<sub>3</sub> mit einer Wachstumsrate von 3 Prozent pro Jahr bis 1993.
- 5) Die Gruppe 2 umfaßt andere vollhalogenierte FCKW, für die es bisher keine Angaben gibt.

ter Tropenwaldfläche werden dabei im Durchschnitt 11 800 Tonnen Kohlenstoff freigesetzt (2).

Mit dem EK-Szenario London soll der Status-quo mit einem FCKW-Ausstieg bis 2010 (beziehungsweise bis 2015 beim Methylchloroform) abgeschätzt werden.

**1.1.2 EK-Szenario Washington**

In diesem Szenario bleiben alle Annahmen über FCKW, CO<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub> und N<sub>2</sub>O unverändert wie in EK-Szenario London beziehungsweise dem IPCC-Szenario BAU. Für das teilhalogenierte H-FCKW 22 wird nach einem US-Vorschlag angenommen, daß seine Produktion bis 2040 vollständig eingestellt wird. In der Zwischenzeit entwickelt sich die H-FCKW 22 Emission nach folgendem Plan (vgl. Abb. 2): Von 1986 bis 1989 steigt sie um 3 Prozent pro Jahr an; von 1990 bis 2010 erfolgt ein weiteres Wachstum von 3 Prozent pro Jahr plus ein Ersatz der FCKW aus Gruppe 1 zu 100 Prozent durch H-FCKW 22; von 2011 bis 2040 wird eine gleichmäßige Abnahme auf Null angenommen. Mit diesem Szenario soll die Wirkung einer zeitweisen Nutzung von H-FCKW 22 und der Ausstieg bis 2040 getestet werden.

**1.1.3 EK-Szenario Bonn**

Dieses Szenario basiert auf den Empfehlungen der Enquete-Kommission zur Verschärfung des Montrealer Protokolls in der Fassung der 2. Vertragsstaatenkonferenz von London; Ausnahmeregelungen fallen weg, und in Teilregionen wird der Ausstieg beschleunigt (vgl. Abschnitt D, 5. Kap., Nr. 5). Die Abschaffung der Ausnahmeregelungen führt zu dem in Tabelle 4 dargestellten abgewandelten globalen Reduktionsplan für die einzelnen Stoffgruppen. Für den Ausstieg

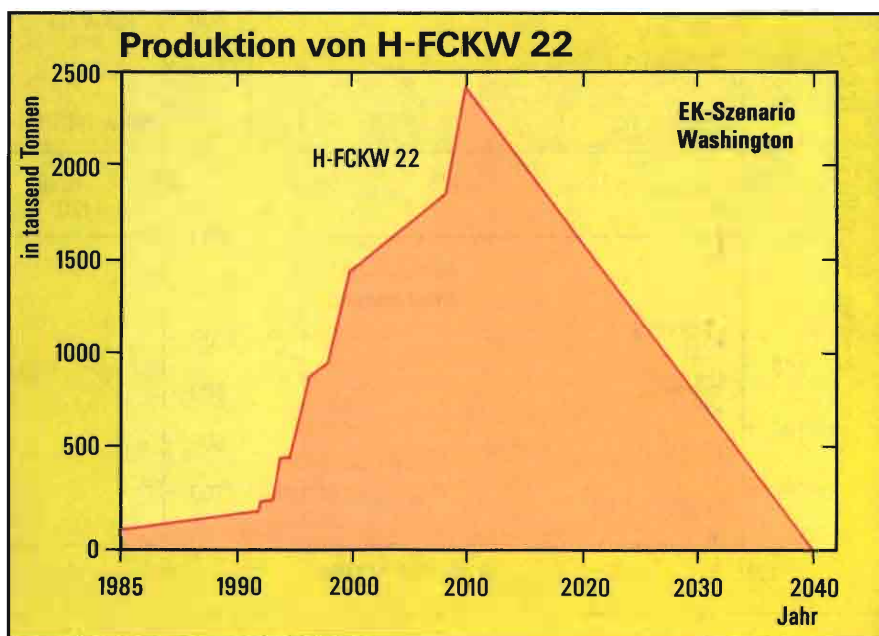


Abb. 2: Globale H-FCKW 22-Produktion nach Vorschlägen von Washington. Produktions-Ausstieg: 2040

Tabelle 4

### Reduktionsplan für FCKW- und Halone-Vereinbarungen ohne Ausnahmeregelungen (3)

Die Zahlen gelten für die Vereinbarungen des Montrealer Protokolls in der Fassung der 2. Vertragsstaatenkonferenz von London

Basisjahr Jahr (jeweils 1. 1.)	Reduktion in Prozent für die Stoffgruppen <sup>5)</sup>			
	Gruppe 1 <sup>1)</sup> 1986	Gruppe 2 <sup>2)</sup> 1986	Gruppe 4 <sup>3)</sup> 1989	Gruppe 5 <sup>4)</sup> 1989
1990	0			
1992		0		
1993	- 20		- 50	0
1995	- 50	- 50	- 85	- 30
1997	- 85			
2000	-100	-100	-100	- 50
2005				-100

1) Hierzu gehören die vollhalogenierten FCKW 11, 12, 113, 114, und 115 mit Wachstumsraten pro Jahr bis 1990 von 9 %, 7 %, 10 %, 6 % und 6 %.

2) Hierzu gehören die Halone 1211, 1301 und 2402 (ausgenommen von diesem Fahrplan sind „essential uses“, auf die sich die Staaten ab 1. 1. 1993 einigen müssen); hier aber nur H-1301 betrachtet mit einer Wachstumsrate von 6 Prozent pro Jahr bis 1992.

3) Hierzu gehört CCl<sub>4</sub> mit einer Wachstumsrate von 4 Prozent pro Jahr bis 1993.

aus der Nutzung und Produktion von FCKW in der Bundesrepublik Deutschland wird folgender beschleunigter Zeitplan vorgeschlagen:

- bis Ende 1990 eine Reduktion um 50 Prozent
- bis Ende 1992 eine Reduktion um 75 Prozent
- und bis Ende 1995 der vollständige Ausstieg.

Die EG verringert bis Ende 1992 die FCKW-Produktion um 50 Prozent, bis Ende 1995 um 75 Prozent, und bis Ende 1997 folgt der vollständige Ausstieg. Für H-FCKW 22 und Methylchloroform ist ein vollständiger Ausstieg bis zum Jahre 2005 vorgesehen. Abbildung 3 zeigt, in welchem Maße die Produktionsmengen der einzelnen Substanzen in den Regionen und den festgelegten Zeitperioden verringert werden müssen. Die Annahmen über die CO<sub>2</sub>-, CH<sub>4</sub>- und N<sub>2</sub>O- Emissionen sind identisch mit dem EK-Szenario London. Mit diesem Szenario soll die Wirkung von verschärften und beschleunigten Ausstiegsplänen für FCKW bis 2000 und für H-FCKW 22 sowie Methylchloroform bis 2005 getestet werden.

4) Hierzu gehört CH<sub>3</sub>CCl<sub>3</sub> mit einer Wachstumsrate von 3 Prozent pro Jahr bis 1993.

5) Die Gruppe 2 umfaßt andere vollhalogenierte FCKW, für die es bisher keine Angaben gibt.

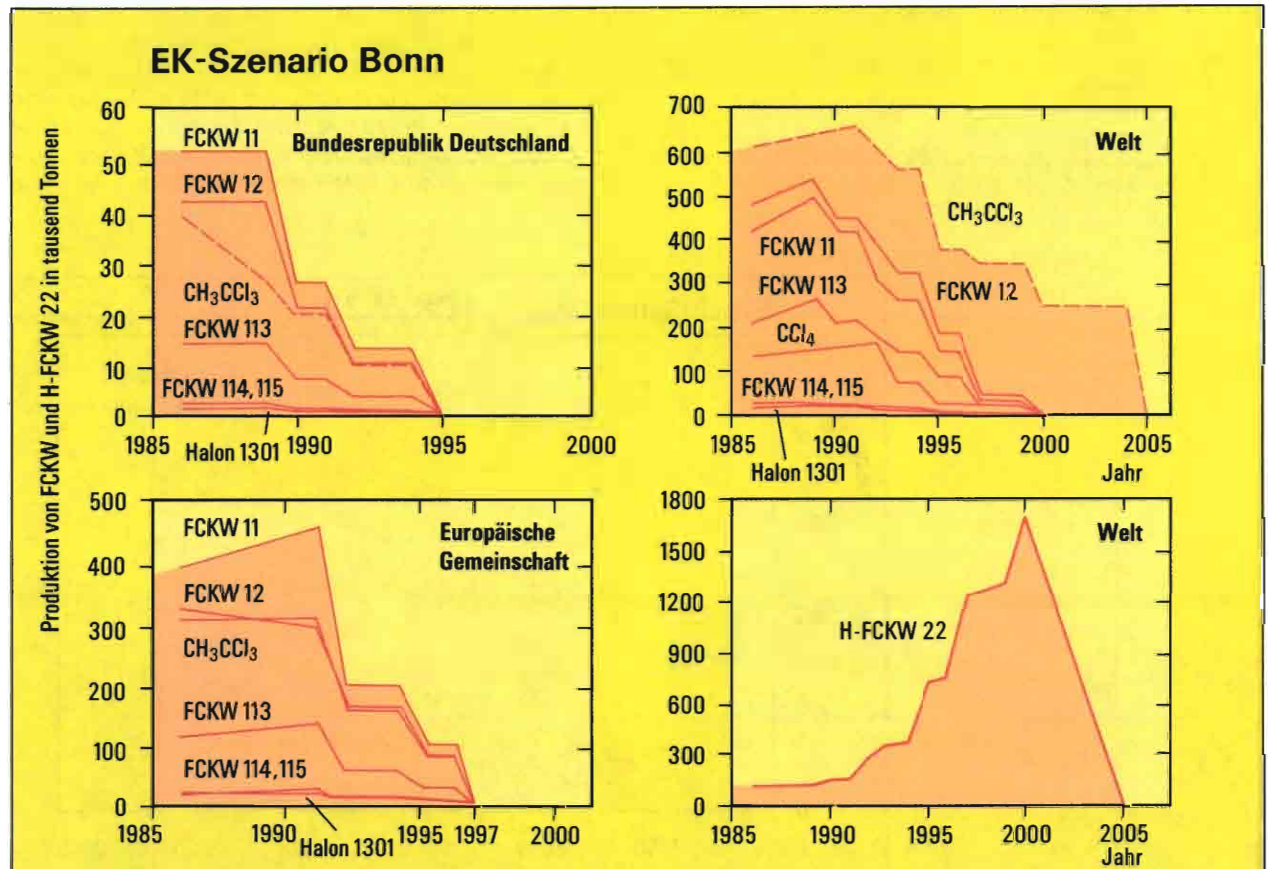


Abb. 3: FCKW-Produktion nach dem Montrealer Protokoll in der Fassung der 2. Vertragsstaatenkonferenz von London unter Inanspruchnahme der Ausnahmeregelungen im EK-Szenario Bonn. FCKW-Ausstieg für a. BRD 1995, b. EG 1997, c. weltweit 2000, d. H-FCKW 22 Produktion im EK-Szenario Bonn; Ausstieg weltweit: 2005 (4).

1.1.4 EK-Szenario Brasilia

Die H-FCKW 22 Emissionen sind identisch mit EK-Szenario Bonn, und diejenigen von CO<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub> und N<sub>2</sub>O mit EK-Szenario London. Der weltweite FCKW-Ausstieg wird auf Ende 1997 um drei Jahre vorgezogen. Mit diesem Szenario soll die Wirkung eines beschleunigten globalen FCKW-Ausstiegs bis 1997 getestet werden.

1.2 EK-Szenarien zur CO<sub>2</sub>-Reduktion

1.2.1 EK-Szenario A

In diesem Status-quo-Szenario ändern sich die energiebedingten CO<sub>2</sub>-Emissionen nach dem IPCC-Szenario BAU (business-as-usual) (vgl. Nr. 1.3). EK-Szenario A in Abbildung 4 zeigt im Gegensatz zum niedrigsten EK-Szenario D einen steilen Anstieg des CO<sub>2</sub>-

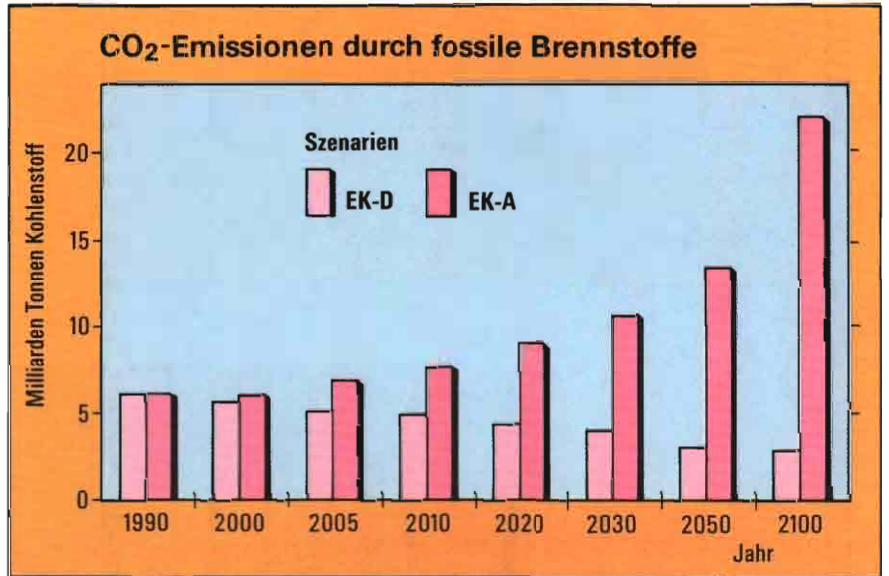


Abb. 4: CO<sub>2</sub>-Emissionen fossiler Brennstoffe in den EK-Szenarien A (Status-quo) und D

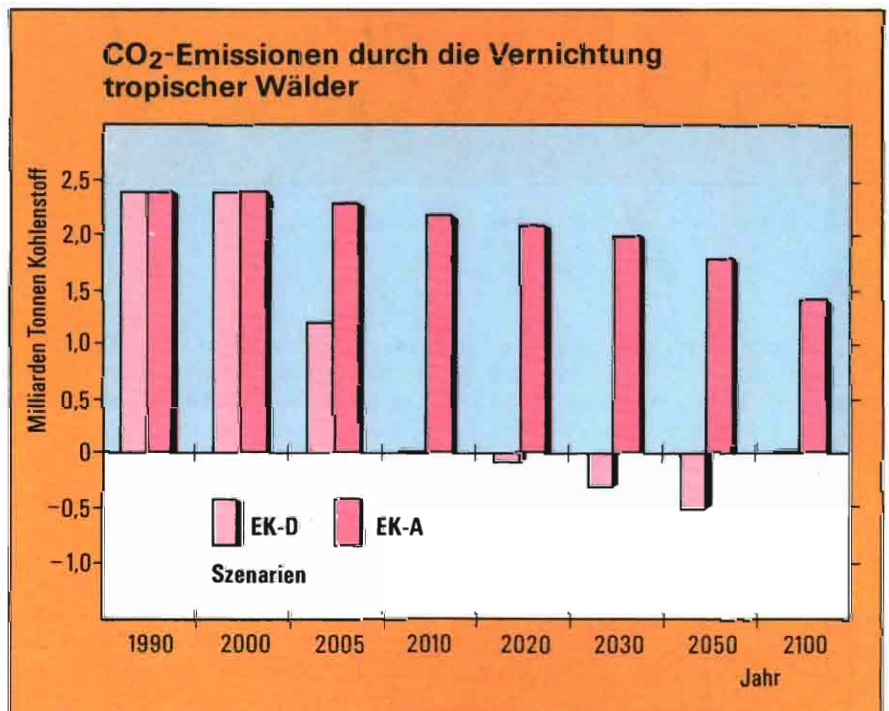


Abb. 5: CO<sub>2</sub>-Emissionen durch die Tropenwald-Vernichtung bzw. Rettung in den EK-Szenarien A und D

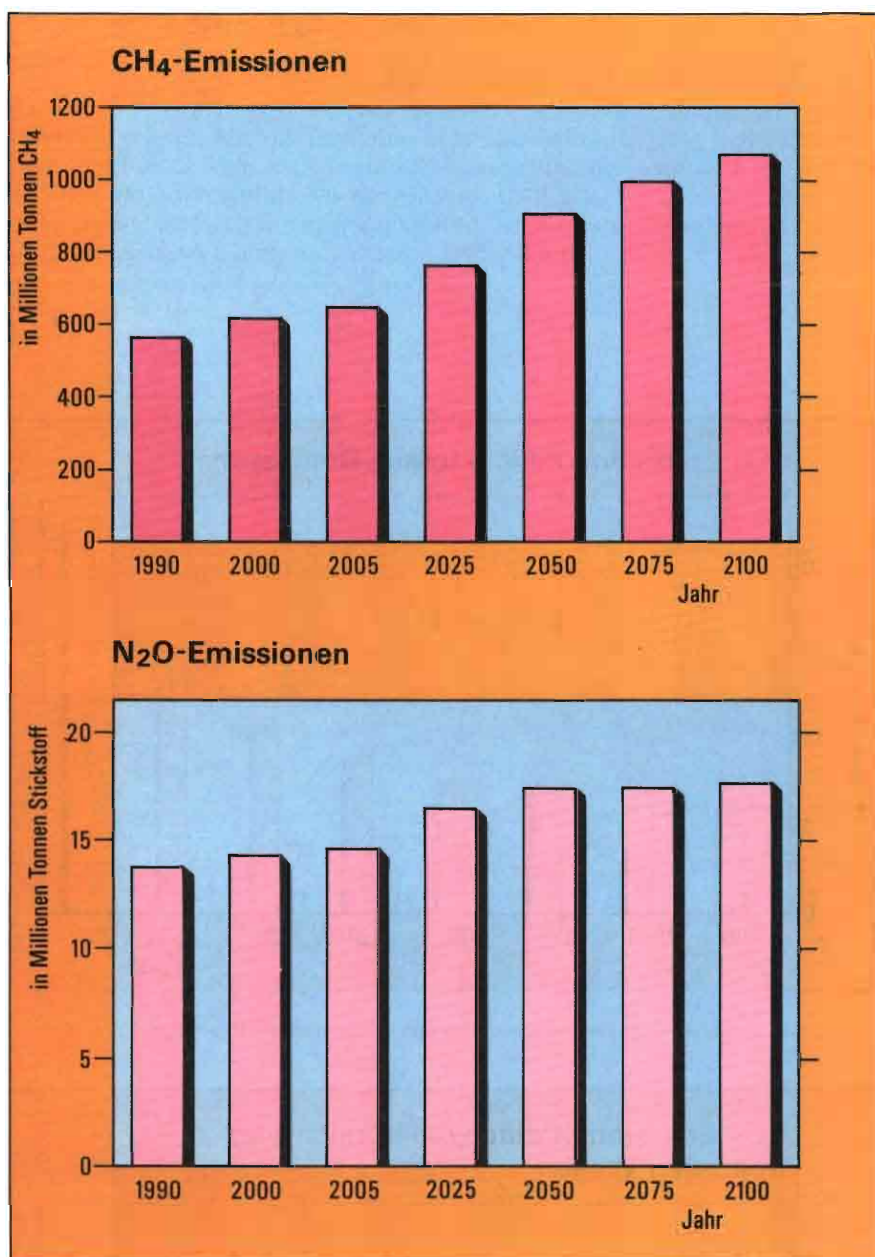


Abb. 6: Globale CH<sub>4</sub>- und N<sub>2</sub>O-Emissionen sämtlicher EK-Szenarien

Ausstoßes um etwa 280 Prozent von 1990 bis 2100. Die CO<sub>2</sub>-Emission durch die Abholzung der tropischen Wälder ist identisch mit der in EK-Szenario London (vgl. Nr. 1.1.1). Abbildung 5 zeigt für EK-Szenario A eine stetige CO<sub>2</sub>-Abnahme um etwa 40 Prozent bis zum Jahre 2100 gegenüber dem Wert von 1990.

Die CH<sub>4</sub>- und N<sub>2</sub>O-Emissionen folgen dem hohen IPCC-Szenario BAU. Abbildung 6 zeigt den zeitlichen Verlauf des Anstiegs. Von 1990 bis 2100 nimmt der Ausstoß von CH<sub>4</sub> und N<sub>2</sub>O um 90 beziehungsweise 28 Prozent zu. Diese Entwicklung wird in allen Szenarien beibehalten. Die Änderung der Produktion von FCKW erfolgt nach dem Montrealer Protokoll in der Fassung der 2. Vertragsstaatenkonferenz von London unter Inanspruchnahme der Ausnahmeregelungen (EK-Szenario London), und die Änderung der Produktion

von H-FCKW 22 erfolgt nach dem EK-Szenario Washington. Mit diesem Szenario soll die Wirkung der Entwicklung bei Beibehaltung des Status-quo abgeschätzt werden.

### 1.2.2 EK-Szenario B

In diesem Szenario gelten für die Emissionen von CO<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub> und N<sub>2</sub>O die gleichen Annahmen wie in EK-Szenario A. Die Produktion von FCKW und H-FCKW 22 folgt den Empfehlungen der Kommission (EK-Szenario Bonn in Nr. 1.1.3). Mit diesem Szenario soll die Wirkung von verschärften Maßnahmen und beschleunigten Ausstiegsplänen für FCKW und H-FCKW 22 auf die atmosphärische Konzentration und den zusätzlichen Treibhauseffekt erfaßt werden.

### 1.2.3 EK-Szenario C

Mit diesem Szenario soll abgeschätzt werden, wie wirksam der von der Kommission im 2. Bericht empfohlene Tropenwald-Rettungsplans zur Reduktion der CO<sub>2</sub>-Konzentration in der Atmosphäre und des zusätzlichen Treibhauseffekts beitragen kann. Folglich werden der energiebedingte CO<sub>2</sub>-Ausstoß sowie die Emissionen von CH<sub>4</sub> und N<sub>2</sub>O nicht geändert und folgen EK-Szenario A beziehungsweise dem IPCC-Szenario BAU, während die Produktionen von FCKW und H-FCKW 22 mit den Annahmen im EK-Szenario B identisch sind.

Der Tropenwald-Rettungsplan der Kommission sieht in der 1. Stufe vor, die Vernichtungsrate von 1990 bis 2000 auf die Rate des Jahres 1980 abzusenken. In der 2. Stufe soll bis spätestens zum Jahre 2010 die Tropenwaldvernichtung gestoppt werden, sodaß der absolute Flächenbestand nicht weiter abnimmt. In der 3. Stufe sollen die Tropenwaldbestände von 2010 bis 2030 wieder den Umfang des Jahres 1990 erreichen. Die Auswirkungen dieser Maßnahmen auf die CO<sub>2</sub>-Emissionen beziehungsweise die Einbindung von CO<sub>2</sub> in die Biomasse sind in Abbildung 5 im vorderen Säulenverlauf dargestellt. Durch die Vernichtung von etwa 3 Millionen km<sup>2</sup> Primärwald werden von 1990 bis 2010 insgesamt etwa 36,6 Milliarden Tonnen Kohlenstoff in die Atmosphäre abgegeben. Etwa 50 Prozent davon oder 18,3 Milliarden Tonnen Kohlenstoff werden der Atmosphäre durch Aufforstung einer gleich großen Fläche mit Sekundärwald von 2010 bis 2080 wieder entzogen (dargestellt durch die negativen Emissionen in Abbildung 5). Ab 2030 sind die Flächen, die aufgeforstet werden genauso groß wie diejenigen, die abgeholzt werden, so daß die Waldfläche insgesamt konstant bleibt. Die in der 3. Stufe ab 2010 eingeleitete Aufforstung entzieht der Atmosphäre zwar nur 50 Prozent der durch die Tropenwaldvernichtung von 1990 bis 2010 verursachten CO<sub>2</sub>-Emissionen, aber – und das ist ausschlaggebend – in der kritischen Übergangsphase hin zu einer kohlenstoffemissionsärmeren Wirtschaftsweise wird durch die Einbindung von Kohlenstoff in die Biomasse der Atmosphäre CO<sub>2</sub> signifikant entzogen (siehe auch die negativen Werte der Tropenwaldkurve (TW) in Abbildung 8).

### 1.2.4 EK-Szenario D

Mit diesem Szenario soll die Wirksamkeit der von der Kommission in diesem Bericht empfohlenen Reduktionsziele für die energiebedingten CO<sub>2</sub>-Emissionen abgeschätzt werden. Dieses Szenario beruht insbesondere auf der Erkenntnis, daß die Verteilung der Reduktionspflichten sowohl den unterschiedlichen wirtschaftlichen und technischen Entwicklungen als auch Kriterien der Gleichbehandlung Rechnung tragen muß. Daraus ergibt sich ein Nachholbedarf für die Entwicklungsländer. Ein globaler Emissionsreduktionsplan hat nur dann Aussicht auf Erfolg, wenn anhand eines Kriterienkatalogs, der alle wichtigen Aspekte berücksichtigt, die Reduktionspflichten den Hauptemittenten zugeteilt werden können. In Abschnitt F befaßt sich die Kommission im Detail mit möglichen Kriterien, die als Grundlage für Verhandlungen über eine Verteilung von Emissions-Reduktionspflichten dienen können.

Für eine gerechte Verteilung der Reduktionspflichten ist eine große Menge an Information erforderlich, die in vielen Fällen nicht vorhanden ist. Auf internationaler Ebene wurde damit begonnen, die nötige Information zusammenzutragen (5). Auf nationaler Ebene hat die Kommission mit ihrem Energiestudienprogramm die Initiative für eine koordinierte Gesamtschau ergriffen.

Tabelle 3 und Abbildung 6 in Abschnitt A geben einen vergleichenden Einblick in den Gesamt- und den Pro-Kopf-CO<sub>2</sub>-Ausstoß von 1986. Abbildung 7 zeigt die von 1950 bis 1986 kumulierte CO<sub>2</sub>-Emission für die 15 Länder, die am stärksten daran beteiligt sind. Die USA und die UdSSR liegen sowohl bei der Emissionsmenge pro Jahr als auch bei den kumulierten Emissionen an der Spitze. Während sie 1986 1,3 Milliarden Tonnen Kohlenstoff beziehungsweise 1,0 Milliarden Tonnen Kohlenstoff als CO<sub>2</sub> emittierten und damit einen Anteil von 24 beziehungsweise 19 Prozent hatten, waren es kumuliert über den Zeitraum 1950 bis 1986 37 Milliarden Tonnen Kohlenstoff entsprechend 31 Prozent der weltweiten Emissionen beziehungsweise 22 Milliarden Tonnen Kohlenstoff entsprechend 18 Prozent (vgl. Abb. 7). Deutschland (Bundesrepublik und ehemalige DDR) liegt 1986 mit etwa 290 Millionen Tonnen Kohlenstoff als CO<sub>2</sub> hinter China an vierter Stelle und rückt beim kumulierten CO<sub>2</sub>-Ausstoß mit etwa 9 Milliarden Tonnen Kohlenstoff sogar an die dritte Stelle vor. Beim Pro-Kopf-CO<sub>2</sub>-Ausstoß liegt die DDR – abgesehen von einigen kleinen Ländern wie beispielsweise Luxemburg – mit 5,8 Tonnen Kohlenstoff an der Spitze, gefolgt von den USA mit 5,4 Tonnen. Im Vergleich dazu beträgt der Pro-Kopf-CO<sub>2</sub>-Ausstoß in Indien nur 0,2 und in China nur 0,5 Tonnen Kohlenstoff, was aber bei der hohen Bevölkerungszahl zu einer relativ hohen Gesamtmenge führt. Klimarelevant ist vor allem die kumulierte und die aktuelle in die Atmosphäre abgegebene CO<sub>2</sub>-Menge.

In dem speziellen Fall des EK-Szenario D geht die Kommission davon aus, daß ihr für die Bundesrepublik Deutschland erstellter Reduktionsplan für energiebedingte CO<sub>2</sub>-Emissionen mit einem Rückgang bezogen auf 1987, um mindestens

- 30 Prozent bis 2005,
- 50 Prozent bis 2020 und
- 80 Prozent bis 2050

auch auf die wirtschaftsstarken westlichen Industrieländer mit besonders hohen Pro-Kopf-Emissionen übertragen werden kann. Wenn man einige strukturschwache Länder berücksichtigt, ergibt sich für Westeuropa eine etwas geringere Reduktion um 20 Prozent bis 2005, 40 Prozent bis 2020 und 80 Prozent bis 2050. Für die Länder Osteuropas einschließlich der UdSSR ist aus wirtschaftlichen und technologischen Erwägungen in der Anfangsphase bis 2005 mit 10 Prozent und bis 2020 mit 30 Prozent ein noch langsamerer, danach aber der gleiche Reduktionsplan wie für die übrigen Industrieländer vorgesehen. Wichtig für die Kooperationsbereitschaft der Dritten Welt ist es, den Nachholbedarf schon frühzeitig mit zu berücksichtigen. In diesem Szenario führt das schon in der ersten Hälfte des 21. Jahrhunderts zu einer Umkehr der

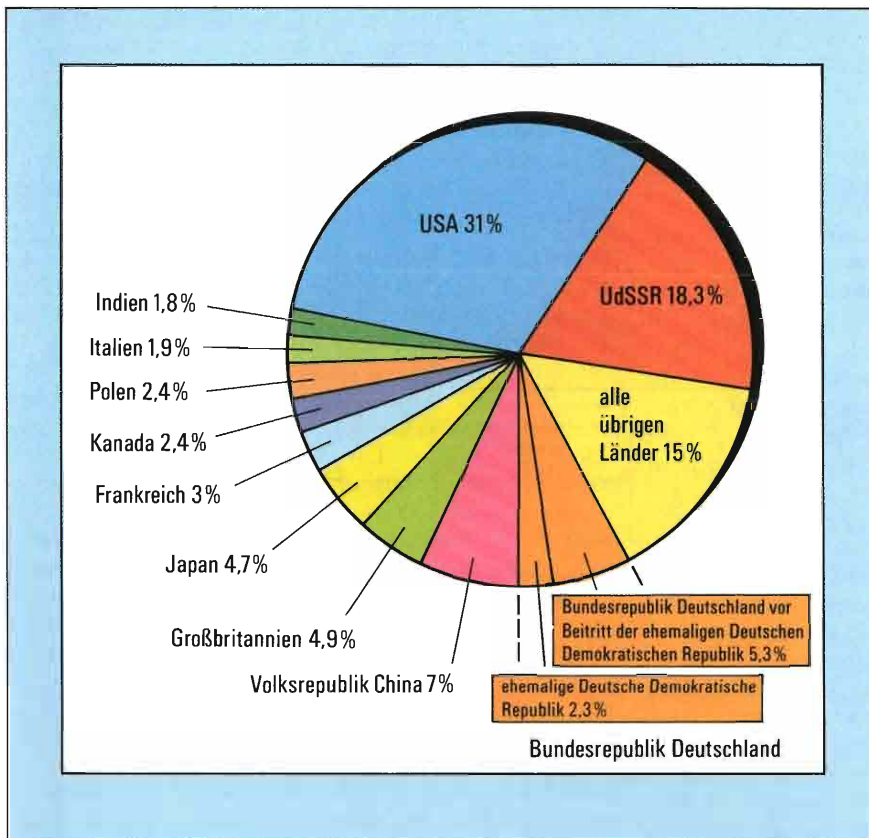


Abb. 7: Energiebedingte CO<sub>2</sub>-Emissionen nach Ländern, kumuliert von 1950 bis 1986 (6).

Emissionsverhältnisse, so daß die Entwicklungsländer einen größeren Anteil am globalen CO<sub>2</sub>-Ausstoß haben als die Industrieländer. Gleichzeitig verlangsamt sich die jährliche Zunahmerate des fossilen Energieverbrauchs, um den Übergang in eine effiziente Energiewirtschaft auf der Basis erneuerbarer Energieträger zu ermöglichen.

Abbildung 8 zeigt den zeitlichen Verlauf der CO<sub>2</sub>-Emissionen aus dem fossilen Brennstoffverbrauch in den einzelnen Regionen. Aus dieser Abbildung gehen die Emissions-Reduktionsziele der einzelnen Regionen deutlich hervor. Für die Industrieländer insgesamt ergibt sich, bezogen auf 1987, eine Abnahme um mindestens

- 20 Prozent bis 2005,
- 40 Prozent bis 2020 und
- 80 Prozent bis 2050.

In den Entwicklungsländern steigt die Emission um

- 50 Prozent bis 2005,
- 60 Prozent bis 2020 und
- 70 Prozent bis 2050.

Für die Industrie- und Entwicklungsländer zusammengekommen ergeben sich CO<sub>2</sub>-Reduktionen von mindestens

- 5 Prozent bis 2005,
- 20 Prozent bis 2020 und
- 50 Prozent bis 2050.

Um die gesamte CO<sub>2</sub>-Einwirkung auf den Treibhauseffekt beurteilen zu können, muß man neben dem

energiebedingten auch den biogenen CO<sub>2</sub>-Ausstoß mit in Betracht ziehen (siehe die Kurve „Gesamt“ in Abbildung 8). Ein Vergleich der Kurve „Gesamt“ (fossile Brennstoffe plus Tropenwald) mit der Kurve „Industrie- und Entwicklungsländer“ (nur fossile Brennstoffe) zeigt deutlich die entlastende Wirkung des Tropenwald-Rettungsplans im nächsten Jahrhundert.

### 1.3 IPCC-Szenarien

Das Umweltprogramm der Vereinten Nationen (UNEP) und die Weltorganisation für Meteorologie haben die USA und die Niederlande im Rahmen der IPCC-Arbeitsgruppen beauftragt, Emissions-Szenarien zu entwickeln. Vier Szenarien wurden erarbeitet, nämlich ein hohes „business-as-usual“ Szenario, zwei mittlere Szenarien Br und Cr und ein niedriges Szenario Dr. Später wurde ein noch niedrigeres Szenario Er hinzugefügt. Erfasst wurden die Emissionen von CO<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub>, N<sub>2</sub>O, den FCKW, CO und NO<sub>x</sub> von 1985 bis 2100 (7).

Bevölkerungs- und Wirtschaftswachstum wird in allen Szenarien in Betracht gezogen. Es wird angenommen, daß die Weltbevölkerung auf etwa 10,5 Milliarden Menschen in der zweiten Hälfte des 21. Jahrhunderts anwächst. Es wird weiterhin in den nächsten Jahrzehnten ein Wirtschaftswachstum von 2 bis 3 Prozent pro Jahr in den OECD-Ländern und 3 bis 5 Prozent pro Jahr in den Ländern Osteuropas und in den Entwicklungsländern angenommen. Danach wird ein abneh-

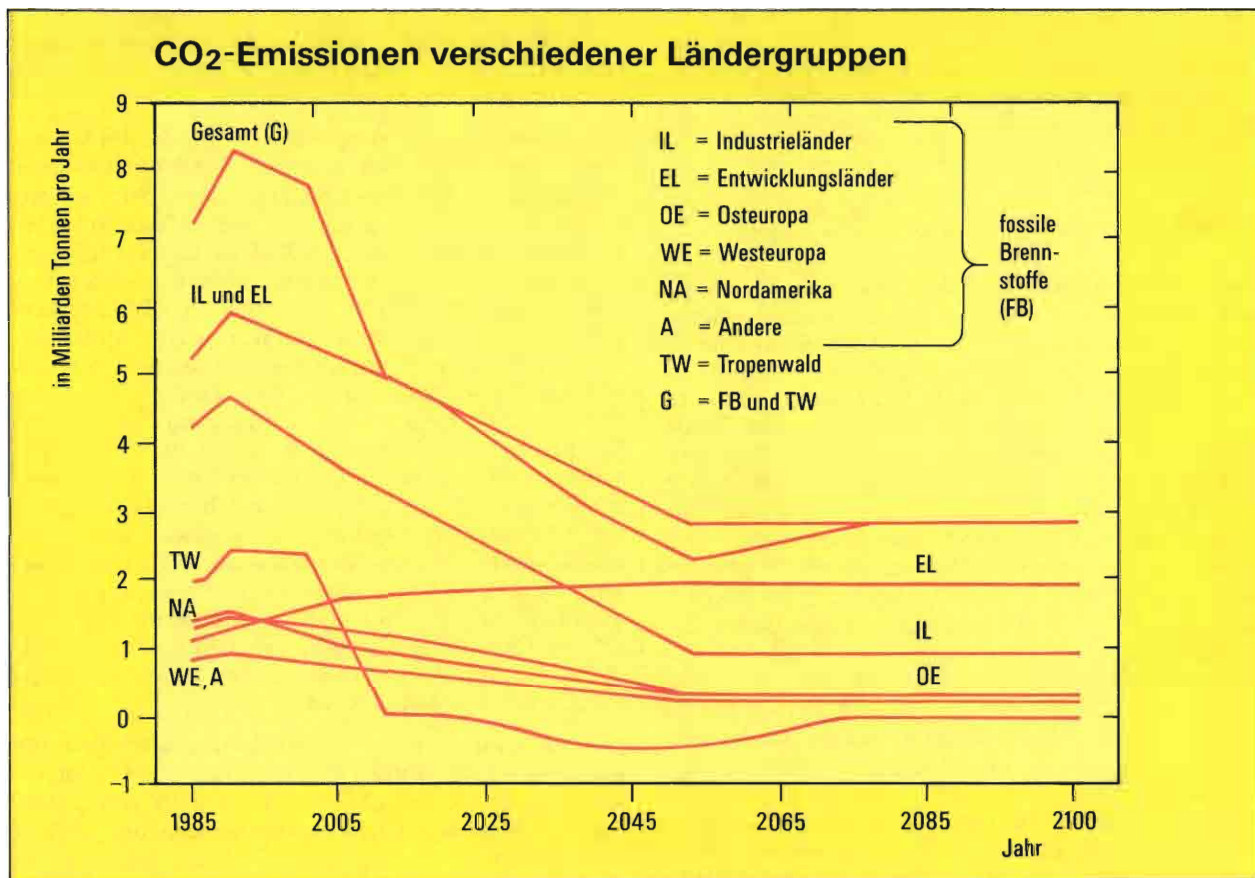


Abb. 8: Zuordnung der CO<sub>2</sub>-Emissionen nach Ländergruppen für das EK-Szenario D (Reduktion fossilen Brennstoffverbrauchs und Tropenwald-Rettungsplan).

mendes Wirtschaftswachstum unterstellt. Darüber hinaus werden unterschiedliche Entwicklungen im Technologiesektor und im Umweltbereich angenommen.

Die fünf Szenarien unterscheiden sich wie folgt:

– **Szenario „business-as-usual“ (BAU):**

Auf der Angebotsseite steht die intensive Nutzung von Kohle im Vordergrund. Auf der Nachfrageseite werden nur bescheidene Effizienzverbesserungen unterstellt. Die Zerstörung der Tropenwälder schreitet bis zu ihrem vollständigen Auslöschen voran. Emissionen von CH<sub>4</sub> und N<sub>2</sub>O aus der Landwirtschaft bleiben unkontrolliert, und die Kontrollen für CO sind gering. Für die FCKW-Kontrolle wird nur eine teilweise Ratifizierung des Montrealer Protokolls unterstellt.

– **Szenario Br:**

Auf der Energieangebotsseite wird angenommen, daß mehr Brennstoffe mit einem geringen Kohlenstoffgehalt, also vor allem Erdgas, eingesetzt werden. Große Effizienzverbesserungen im Energiebereich werden unterstellt. Die Kontrollen von CO<sub>2</sub>-Emissionen werden verschärft, die Tropenwaldvernichtung wird gestoppt und das Montrealer Protokoll von allen Ländern ratifiziert.

– **Szenario Cr:**

In der zweiten Hälfte des 21. Jahrhunderts wird ein substantieller Einsatz von erneuerbaren Energieresourcen und Kernenergie unterstellt. Die Produktion von FCKW wird eingestellt, und landwirtschaftliche Emissionen werden begrenzt.

– **Szenario Dr:**

Hier wird ein merklicher Einsatz von erneuerbaren Energieträgern und Kernenergie schon für die erste Hälfte des nächsten Jahrhunderts unterstellt. Dadurch würden die CO<sub>2</sub>-Emissionen in den Industrieländern stabilisiert. Mit diesem Szenario ist beabsichtigt, durch scharfe Emissionskontrollen in den Industrieländern und mäßige Emissionswachstumsraten in den Entwicklungsländern die Konzentration in der Atmosphäre zu stabilisieren.

– **Szenario Er:**

Dieses Szenario unterscheidet sich von Szenario Dr nur dadurch, daß in der ersten Hälfte des nächsten Jahrhunderts für die CO<sub>2</sub>-Emissionen größere Reduktionsraten angenommen werden, während alle anderen Annahmen mit Szenario Dr identisch sind. So nimmt, bezogen auf 1985, die CO<sub>2</sub>-Emission im Jahr

2000 um 7 Prozent und 2025 um 15 Prozent ab, während sie in Szenario Er im Jahr 2000 um 23 Prozent und 2025 um 37 Prozent abnimmt. In der zweiten Hälfte des 21. Jahrhunderts sind die Reduktionsraten in beiden Szenarien sehr ähnlich.

#### 1.4 MPI-Szenarien

Das Max-Planck-Institut für Chemie in Mainz hat sechs Szenarien, erstellt, die sich in vielen Bereichen mit den Szenarien der Enquete-Kommission decken. Sie berücksichtigen hauptsächlich die Reduktion der Emissionen ozonzerstörender Spurengase und sind am Montrealer Protokoll zur Reduktion der FCKW und Halone und seiner auf der zweiten Vertragsstaatenkonferenz in London vereinbarten Verschärfung ausgerichtet. Vier Szenarien dienen hauptsächlich der Abschätzung der Ozonzerstörung, zwei weitere Szenarien, welche mit dem Endbuchstaben „C“ gekennzeichnet sind, dienen der Abschätzung der Auswirkungen auf den Treibhauseffekt. Zur leichteren Zuordnung enthält der Name des Szenarios, dem das Montrealer Protokoll zugrunde liegt, ein „M“ als ersten Buchstaben, während bei den Szenarien, die auf den Ergebnissen der zweiten Vertragsstaatenkonferenz in London basieren, der erste Buchstabe „L“ ist. Die Szenarien, in denen die Forderungen der Enquete-Kommission zur Reduktion ozonzerstörender Substanzen eingehen, sind mit EK gekennzeichnet. Der Buchstabe „D“ deutet auf ein starkes Wachstum der Emissionen von H-FCKW 22 hin, der Buchstabe „W“ auf eine Reduktion der Emissionen von H-FCKW 22 nach dem EK-Szenario Washington.

##### – Szenario MD

In diesem Szenario wird angenommen, daß die Produktion vollhalogenerter FCKW (FCKW 11,12,113,114,115) und der Halone (1211,1301 und 2402) ab 1990 auf den Stand von 1986 reduziert werden. Ab 1994 soll bei den FCKW eine Reduktion der Produktion auf 80 Prozent des Wertes von 1986 durchgeführt werden und schließlich 1999 die Produktion auf die Hälfte der Menge von 1986 zurückgenommen werden. Bei den Halonen sind keine weiteren Reduktionen vorgegeben (vgl. Abschnitt D, 5. Kap., Nr. 1.1.2). Bei der Modellierung des Montrealer Protokolls wurde deshalb angenommen, daß die FCKW-Produktion ab 1999 und die Halone-Produktion ab 1990 konstant bleibt. Zwischen 1986 und 1990 wurde ein Wachstum um sechs Prozent pro Jahr zugelassen. Eine nach dem Protokoll mögliche Verschiebung zwischen den einzelnen FCKW sowie Ausnahmeregelungen wurden ausgeschlossen.

Die Umrechnung von Produktion auf Emission erfolgt wie von Brühl und Hennig (8) beziehungsweise Brühl und Crutzen (9) dargestellt. Bei FCKW 11 in Hartschäumen wurde angenommen, daß 10 Prozent bei der Herstellung der Schaumstoffe entweicht und der Rest gleichmäßig während der folgenden 20 Jahre an die Atmosphäre abgegeben wird. Bei den Halonen, die hauptsächlich in Feuerlöschsystemen gespeichert sind, sollen pro Jahr 1/7 der vorhandenen Menge von

Halon 1211 und 5/18 von Halon 1301 freigesetzt werden (10). Bei einer deutlichen Produktionsverringering bedeutet dies eine deutliche Verschiebung des Rückgangs der Emissionen.

Für die teilhalogenierten FCKW wurde folgendes angenommen: Die Emissionen von H-FCKW 22 steigen jährlich um drei Prozent bis zum Jahre 2015, da die USA in Gesetzesentwürfen eine Beschränkung für H-FCKW 22 erst 2015 vorsieht. Des weiteren wurde angenommen, daß in den Industriestaaten das als Kühlmittel eingesetzte FCKW 12 durch H-FCKW 22 ersetzt wird. In den Entwicklungsländern wird zugelassen, daß der pro Kopf Verbrauch an Kühlmitteln auf das Niveau der Industrieländer (zur Zeit etwa 0,3 kg FCKW 12 pro Kopf, entsprechen 0,2 kg H-FCKW 22 bei gleicher Kälteleistung (11)) innerhalb von 40 Jahren ansteigt. Das Bevölkerungswachstum in den Entwicklungsländern wurde bis zum Jahre 2040 mit jährlich 1,6 Prozent angegeben. Ausgangswert waren vier Milliarden Menschen. Anschließend bleibt die Bevölkerungszahl konstant. Bei diesem Szenario erreicht man nahezu die hohen Emissionsraten für H-FCKW 22 von 2,9 Millionen Tonnen pro Jahr im Jahre 2050, die vom Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) vorgeschlagen werden.

Die Emissionen von Methylchloroform steigen bis zum Jahre 2000 jährlich um drei Prozent und bleiben anschließend konstant. Die Emissionen von Tetrachlorkohlenstoff (CCl<sub>4</sub>) steigen ebenfalls um jährlich drei Prozent an.

Bei allen voll- und teilhalogenierten FCKW wird angenommen, daß 95 Prozent auf der Nordhalbkugel emittiert werden. Die Zunahme der Emission von H-FCKW 22 in den Entwicklungsländern wurde nach dem jetzigen Bevölkerungsanteil auf die Hemisphären verteilt.

Für CH<sub>4</sub> wurde folgendes angenommen (11):

$$\mu\text{CH}_4 = 1,71 + 0,017 \times (t - 1986) \text{ ppmv}$$

Bei CO<sub>2</sub> wird eine Zunahme der Konzentration um 0,4 Prozent pro Jahr angesetzt, welche für längere Zeiträume repräsentativ ist. Die N<sub>2</sub>O-Konzentration wächst mit ihrer gegenwärtigen Rate von 0,25 Prozent pro Jahr weiter. Die Emissionen von CO sind konstant und betragen 555 Millionen Tonnen Kohlenstoff pro Jahr auf der Nordhalbkugel und 225 Millionen Tonnen Kohlenstoff pro Jahr auf der Südhalbkugel. Die Emissionen von Stickoxiden auf der Nordhalbkugel (unter Vernachlässigung der NO<sub>x</sub>-Emissionen durch Blitze) steigen von 28 Millionen Tonnen Stickstoff pro Jahr Ende 1985 auf 54 Millionen Tonnen Stickstoff pro Jahr 2030 und bleiben dann konstant (12). Auf der Südhalbkugel werden konstante Emissionen von 5 Millionen Tonnen Stickstoff pro Jahr angenommen. Hierbei sollen industrielle Quellen fast ausschließlich auf der Nordhalbkugel sein, natürliche Quellen zu 70 Prozent und Biomassenverbrennung zu 55 Prozent (13).

##### – Szenario LD

Nach diesem Szenario werden die Emissionen der FCKW und der Halone wie in EK-Szenario London reduziert. Es wird also angenommen, daß die interna-



tionale Vereinbarung der zweiten Vertragsstaatenkonferenz zum Montrealer Protokoll in London im Juni 1990 mit den entsprechenden Ausnahmeregelungen eingehalten wird. Die Emissionen von H-FCKW 22 steigen analog zum Szenario MD an. Für Methylchloroform gilt folgender Reduktionsplan:

1993 Einfrieren der Produktion auf dem Stand von 1989, Reduzierung um 30 Prozent bis 1995, Produktionshalbierung bis zum Jahr 2000, Produktionseinstellung bis 2005. Für die Entwicklungsländer werden Ausnahmeregelungen zugelassen.

Es wird angenommen, daß 1986 von 135 000 Tonnen des bei der Produktion von FCKW 11 und FCKW 12 verwendeten Tetrachlorkohlenstoffs ( $\text{CCl}_4$ ) 35 000 Tonnen freigesetzt wurden. Der Anteil folgt den Reduktionsmaßnahmen der FCKW-Produktion. Der Rest der Emissionen, der unter anderem vom Einsatz dieses Stoffes als Lösemittel kommt, soll nach den Vereinbarungen der zweiten Vertragsstaatenkonferenz zum Montrealer Protokoll nach folgendem Zeitplan reduziert werden: Halbierung 1993, Reduktion auf 15 Prozent 1995, Einstellung 2000. Die Ausnahmeregelungen werden ausgenutzt.

Die Emissionen der restlichen Treibhausgase stimmen mit denen in Szenario MD überein.

#### — Szenario LW

Dieses Szenario ist identisch mit dem Szenario LD, abgesehen von den H-FCKW 22-Emissionen. Die starke Zunahme des H-FCKW 22-Einsatzes soll in diesem Szenario nicht stattfinden, jedoch sollen in den Industrieländern 50 Prozent der von der Reduktion betroffenen FCKW-Produktion durch H-FCKW 22 ersetzt werden. Gemäß den Gesetzesentwürfen der Regierung der USA soll ab dem Jahre 2015 die H-FCKW 22-Produktion 20 Jahre konstant bleiben und dann bis zum Jahre 2040 gleichmäßig auf Null reduziert werden.

#### — Szenario EK

Dieses Szenario ist für die ozonzerstörenden Spurengase FCKW, Halone, H-FCKW 22, Methylchloroform und Tetrachlorkohlenstoff identisch mit dem EK-Szenario Bonn (vgl. Nr. 1.1.3). Die Emissionen der restlichen Treibhausgase sind identisch mit denen von Szenario MD (vgl. Nr. 1.4.1).

#### — Szenario EKC

Dieses Szenario entspricht — ebenso wie Szenario EK — für die ozonzerstörenden Spurengase dem EK-Szenario Bonn (vgl. Nr. 1.1.3), für die restlichen Treibhausgase dem IPCC-Szenario Dr (vgl. Nr. 1.3).

#### — Szenario LWC

Dieses Szenario entspricht für die ozonzerstörenden Spurengase dem Szenario LW (vgl. Nr. 1.4.3), für die restlichen Treibhausgase dem IPCC-Szenario BAU (vgl. Nr. 1.3).

## 2. Klimamodelle für Szenarienrechnungen der Enquete-Kommission

### 2.1 Das vereinfachte Modellsystem

Zur Abschätzung der Wirkung der Treibhausgasemissionen auf die zukünftige Klimaentwicklung stehen verschiedene ein- bis dreidimensionale Klimamodelle zur Verfügung. Die komplexen dreidimensionalen Modelle können zwar das Klimasystem am realistischsten darstellen, sie sind aber auch nur auf Großrechnern einzusetzen. Mit der gegenwärtigen Rechnergeneration läßt sich nur eine sehr begrenzte Anzahl von Szenarien berechnen. Es ist deshalb gängige Praxis, vereinfachte Klimamodelle einzusetzen als Hilfsmittel für die Interpretation der Ergebnisse komplexerer Modelle, für Sensitivitätsstudien, in denen das Verhalten von Modellen bei Änderungen von Parametern untersucht wird, und als Hilfe für Entscheidungen zwischen verschiedenen Szenarien der Emissionsverringerung. Hier wird zuerst das vereinfachte Modellsystem vorgestellt, das an der Universität Münster zusammengestellt und bis zur Anwendungsreife weiterentwickelt wurde.

Abbildung 9 zeigt die verwendete Modell-Konzeption. Aus den Enquete-Kommissions-(EK)-Szenarien (vgl. Nr. 1.1 und 1.2) werden zunächst zeitabhängige Emissionsraten abgeleitet. Diese bilden die Eingabedaten für Kreislaufmodelle zur Berechnung zukünftiger Konzentrationen von Spurengasen in der Atmosphäre.

#### 2.1.1 Modelle des Kohlenstoffkreislaufs

Die Wahl eines bestimmten Kohlenstoffkreislaufmodells (KKM) kann zu Unsicherheiten in den  $\text{CO}_2$ -Berechnungen beitragen. Tests haben gezeigt, daß das von Oeschger u. a. (14) entwickelte eindimensionale (1-D)-Box-Diffusionsmodell im Vergleich zu anderen KKM die gemessenen Daten am besten wiedergibt (15). Die Berechnungen wurden deshalb mit diesem Modell durchgeführt. Es besteht aus vier Kohlenstoffspeichern zwischen denen  $\text{CO}_2$  ausgetauscht wird, nämlich der Atmosphäre, der Land-Biosphäre, der Ozeanmischungsschicht (etwa 75 m tief) und der Tiefsee (etwa 3700 m tief). Das  $\text{CO}_2$  im Ozean wird durch turbulente Durchmischung (Diffusion) vom Ozeanoberflächen- ins Tiefenwasser transportiert, wobei der Diffusionskoeffizient aus dem Vergleich mit Messungen des radioaktiven Kohlenstoffisotops  $^{14}\text{C}$  hergeleitet wird (16). Der Vergleich zwischen den einzelnen Reservoiren wird schrittweise von 1860 an berechnet. Der in der Atmosphäre verbleibende  $\text{CO}_2$ -Anteil (airborne fraction) wird jeweils aus der Menge fossiler Brennstoffe sowie dem aus der Zerstörung der Biosphäre stammendem  $\text{CO}_2$ -Eintrag berechnet.

Besonders schwierig ist die Modellierung von  $\text{CO}_2$ -Quellen und -Senken der Land-Biosphäre. Sie wird entweder vollkommen ignoriert, in Teilspeichern dargestellt oder gar in mehrere Ökosystemtypen mit jeweils drei bis fünf Teilspeichern unterteilt (17). Die Vernachlässigung oder stark vereinfachte Darstellung der Land-Biosphäre wird damit gerechtfertigt, daß bei

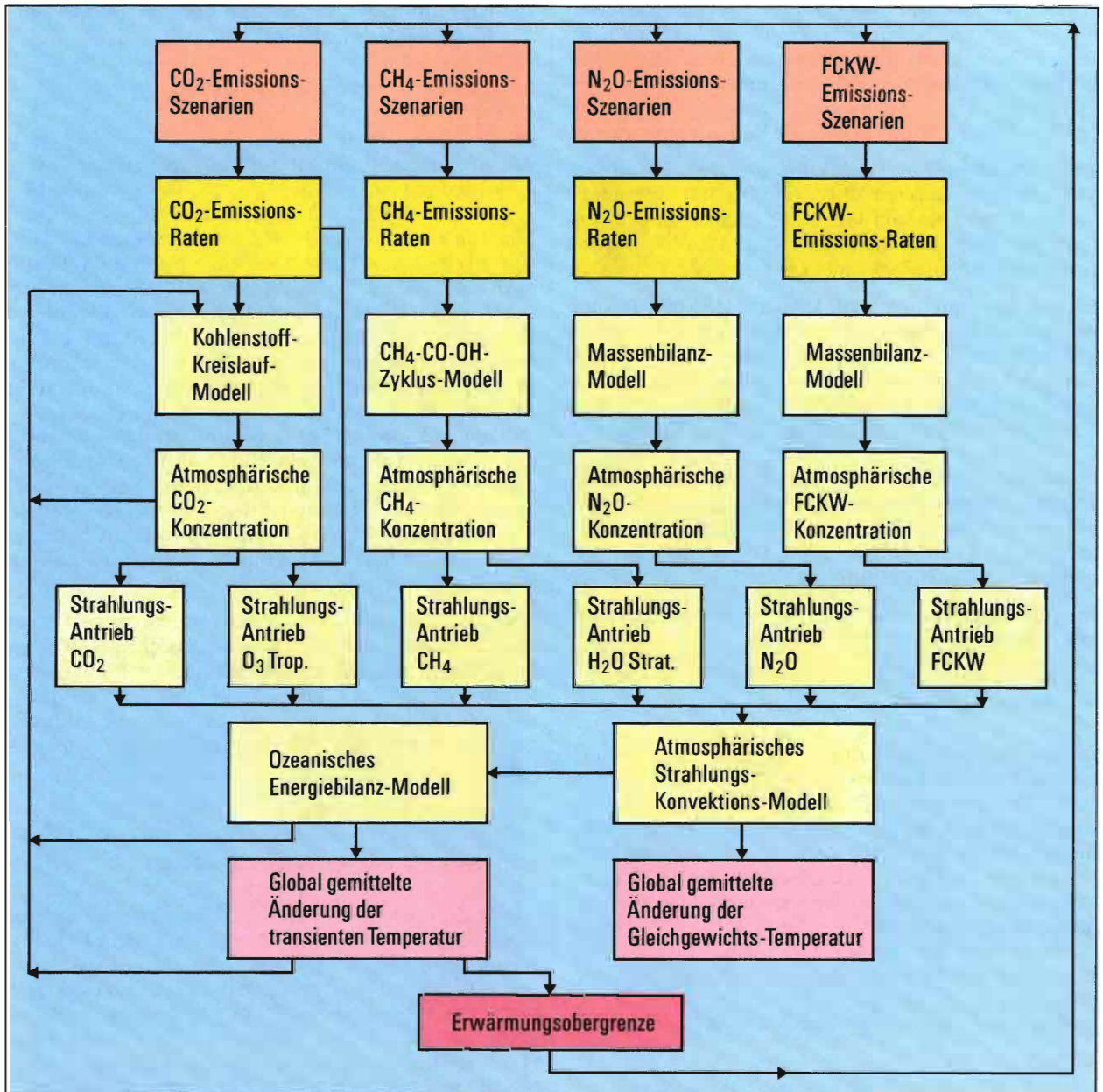


Abb. 9: Konzeption des Münsterschen Klimamodells (15).

der Größe der Lagerstätten fossiler Brennstoffe und einer Zunahme der fossilen  $\text{CO}_2$ -Emissionen von ein bis zwei Prozent im Jahr die Land-Biosphäre als  $\text{CO}_2$ -Quelle oder als  $\text{CO}_2$ -Senke relativ wenig beiträgt. Wenn jedoch politische Maßnahmen zur Herabsetzung der fossilen  $\text{CO}_2$ -Menge eingeleitet werden, werden Rückkopplungen mit der Biosphäre wichtiger.

Deshalb wurde für das hier benutzte Modellsystem der Universität Münster (15) der Biosphärenspeicher im Oeschger-Modell durch mehrere nach Harvey (18) ersetzt. Kohlenstoff existiert dabei in der Vegetation in Form von Holz und krautiger Vegetation, als Abfall (Detritus) sowie als rasch veränderlicher und als beständiger Humus. Die Erwärmung der Erdoberfläche bei erhöhtem Treibhauseffekt und bei Abholzung (vor

allem in den Tropen) steigert über verstärkte Bodenatmung die  $\text{CO}_2$ -Emission, was wiederum den Treibhauseffekt verstärkt und eine wichtige positive Rückkopplung des Systems Klima-Biosphäre darstellt. Negative Rückkopplungen ergeben sich, wenn die Zunahme von  $\text{CO}_2$  in der Atmosphäre zu verstärkter Photosynthese bei gleichzeitig erhöhter Kohlenstoffspeicherung in Form von Holz oder Humus führt.

Das hier benutzte Biosphärenmodell berücksichtigt nicht die möglicherweise beträchtlichen Kohlenstoffflüsse in die Atmosphäre als Folge der Waldschäden und der Wanderung der Waldgesellschaften als Reaktion auf eine Erwärmung. Modellrechnungen von Solomon (19) ergaben, daß bei einer  $\text{CO}_2$ -Verdopplung die lebende Biomasse im östlichen Teil Nordamerikas um etwa zehn Prozent schrumpft.

### 2.1.2 Der Methankreislauf

Zur Berechnung des mittleren Methan-Gehaltes in der Atmosphäre (vgl. Abb. 9) wird das von Rotmans und Eggink (20) vorgestellte Modell verwendet. Es berechnet den  $\text{CH}_4$ -Gehalt aus Quellen und Senken für  $\text{CH}_4$ , Kohlenmonoxid (CO) und Hydroxyl-Radikalen (OH). Die Stärke der CO-Quelle hängt dabei von der Energienutzung, Abholzung, dem Abbrennen von Vegetation und dem Brennholzverbrauch sowie von der Weltbevölkerungsentwicklung ab. Die Hydroxylradikal-Änderung wiederum hängt ab von der Änderung der Stickoxide ( $\text{NO}_x$ ) und des troposphärischen Ozon ( $\text{O}_3$ ). Die  $\text{NO}_x$ -Quelle ist wieder mit der Energienutzung sowie dem Abbrennen von Vegetation verknüpft. Die Eingabewerte für das troposphärische Ozon stammen aus dem IPCC-Bericht (21).

Der Methangehalt wird für die Zeitspanne von 1860 bis 2100 berechnet, wobei die Breiten- und Höhenabhängigkeit des  $\text{CH}_4$ -Gehaltes vernachlässigt wird (22).

Aus der Atmosphäre wird  $\text{CH}_4$  durch drei Prozesse entfernt: erstens durch Reaktion mit OH-Radikalen, wozu die OH-Produktion auch als Funktion der globalen troposphärischen  $\text{O}_3$ - und  $\text{NO}_x$ -Trends bereitgestellt werden muß. Dabei wird der Verlust durch Reaktion mit CO berücksichtigt. Die beiden anderen  $\text{CH}_4$ -Senken sind die Aufnahme durch die Böden und der Transport in die Stratosphäre. Zur Berechnung des CO-Gehaltes werden als wichtigste Senken die Oxidation durch OH und die Aufnahme im Boden berücksichtigt.

### 2.1.3 Massenbilanzmodell für Distickstoffoxid und Fluorchlorkohlenwasserstoffe

Die Änderung des  $\text{N}_2\text{O}$ -Gehaltes (vgl. Abb. 9) wird mit Hilfe eines von Mintzer (23) benutzten sehr einfachen Modells berechnet, nämlich aus vorjährigem Gehalt, gegenwärtiger Emissionsrate und atmosphärischer Verweilzeit. Der Startwert 1860 wird vorgegeben.

Der FCKW-Gehalt in der Atmosphäre wird nicht unmittelbar aus der produzierten Menge berechnet, sondern aus der, die in die Atmosphäre entwichen ist. Das Ausmaß dieser Verzögerung von der Produktion bis zur Emission ergibt sich nach Bach und Jain (24). Aus Jahresemission, vorjähriger Konzentration und atmosphärischer Verweilzeit eines bestimmten Fluorchlorkohlenwasserstoffs folgt dann der neue Konzentrationswert. Veränderungen in der Verweilzeit als Folge veränderter Konzentration werden nicht beachtet.

### 2.1.4 Beziehung zwischen der Konzentration der Treibhausgase und dem Strahlungshaushalt der Erde

Bei veränderter Konzentration der Treibhausgase verändert sich die Nettostrahlungsflußdichte in allen Höhen. Ein gutes Maß dafür ist die Änderung an der Tropopause (25). Die Beziehung zwischen der Konzentrationsänderung  $\Delta C$  (vgl. Abb. 9) und der Änderung der Nettostrahlungsflußdichte, meist Strahlungs-

antrieb  $\Delta Q$  genannt, muß aus detaillierten Strahlungs-transportmodellen abgeleitet werden. Die mathematische Form des  $\Delta Q$  ( $\Delta C$ ) variiert stark von Gas zu Gas. Dickinson und Cicerone (26) haben gezeigt, daß sich  $\Delta Q$  ( $\Delta C$ ) für Gase mit bereits sehr starker Absorption, wie zum Beispiel für  $\text{CO}_2$ , durch eine logarithmische Beziehung ( $\Delta Q \sim \ln \Delta C$ ) annähern läßt, für bereits mittlere Absorption, zum Beispiel für  $\text{CH}_4$  und  $\text{N}_2\text{O}$ , durch eine Quadratwurzelbeziehung ( $\Delta Q \sim \sqrt{\Delta C}$ ) und für noch schwache Absorber, etwa die FCKW, durch eine lineare Beziehung ( $\Delta Q \sim \Delta C$ ). Da sich die Ozonkonzentration mit der Höhe sehr stark verändert, gilt für dieses Gas keine der einfachen Beziehungen. Für die Berechnung des  $\text{O}_3$ -Trends von 1860 bis 1985 wurde die von UNEP/WMO (35) angegebene Formel benutzt. Für die Projektion in die Zukunft wurde einem Vorschlag von Harvey (27), den troposphärischen  $\text{O}_3$ -Gehalt in Abhängigkeit von den  $\text{CO}_2$ -Emissionen aus dem fossilen Brennstoffverbrauch zu ändern, gefolgt.

Für die Berechnung des Strahlungsantriebs wurden die von Wigley (28), Hansen u. a. (29), Wuebbles u. a. (30) und Fisher u. a. (31) entwickelten einfachen Formeln für  $\Delta Q$  ( $\Delta C$ ) angewendet. Damit steht eine relativ einfache Methode zur Verfügung, um sich einen schnellen Überblick über die Anteile der unterschiedlichen Treibhausgase an den direkten Strahlungsänderungen zu verschaffen. Gewöhnlich werden die Vergleiche pro Einheit volumetrischer Konzentrationsänderung (bezogen auf ein Molekül) oder pro Einheit Massenänderung angegeben. Mit Hilfe der Strahlungsantriebe für die einzelnen Gase läßt sich dann der Gesamteffekt in Form der äquivalenten  $\text{CO}_2$ -Konzentration darstellen. Der nächste Schritt ist die Berechnung der global und zeitlich gemittelten Bodentemperatur (vgl. Abb. 9). Hier wird die parametrisierte Form eines Strahlungskonvektionsmodells nach Ramanathan u. a. (32) verwendet.

Mit diesem Modell lassen sich Gleichgewichtsstudien durchführen, um beispielsweise die unmittelbare Beeinflussung des Modellklimas auf zeitunabhängige oder auch zeitabhängige Veränderungen der Strahlungsantriebe und damit der Treibhausgase zu berechnen (33). Das Ergebnis solcher Rechnungen ist die global gemittelte Gleichgewichtstemperatur (vgl. Abb. 9). Ziel dieser Simulationen ist es unter anderem, die Wirkungsweise der Treibhausgase aufzuzeigen, die Größenordnung ihres Beitrags zum Treibhauseffekt abzuschätzen und den Einfluß von Rückkopplungsprozessen auf die Reaktion des Modellklimas zu zeigen.

### 2.1.5 Energiebilanzmodell

In Wirklichkeit kommt es aber bei der Störung des Klimasystems durch Treibhausgase nicht rasch zu einem neuen Energiegleichgewicht. Das liegt an der großen Wärmekapazität der Ozeane, die den Ausgleich verzögern. Es muß an das beschriebene Atmosphärenmodell ein Ozeanmodell gekoppelt werden (vgl. Abb. 9).

Hier wird das von Harvey und Schneider (34) entwickelte Box-Modell verwendet, ein global gemitteltes Energiebilanzmodell für den Ozean. In diesem Modell

ist eine obere isotherme, also durchmischte Deckschicht an eine Tiefsee gekoppelt, in der vertikal sowie – nur sehr grob – horizontal Wärme sowohl durch turbulente Durchmischung als auch durch großräumige Bewegung transportiert wird. Der horizontale Wärmetransport stellt die thermohaline Zirkulation näherungsweise dar, wobei die in den Polarregionen absinkende Wassermenge gleichmäßig in den anderen Ozeangebieten wieder aufquillt.

Das Modell unterscheidet sich von herkömmlichen Box-Modellen wie folgt:

1. Das Wasser im polaren Absinkbereich der thermohalinen Zirkulation verläßt die Deckschicht mit einer vorgeschriebenen Temperatur und nicht mit der Temperatur der Mischungsschicht. Es erreicht den Meeresgrund mit der dort vorherrschenden Temperatur.
2. Eine Advektions-Diffusionsgleichung für die Tiefsee wird gelöst, wobei nicht in weitere isotherme Schichten unterteilt wird.
3. Im Gegensatz zu dem für den IPCC-Bericht (35) benutzten Box-Modell von Hoffert u. a. (36) erlaubt das hier verwendete Modell Änderungen der turbulenten Diffusion von Wärme und Änderungen der Advektionsgeschwindigkeit und somit deren Veränderung mit der Temperatur.

### 2.1.6 Temperaturänderungen mit und ohne Kopplung an den Ozean

Mit dem Strahlungskonvektionsmodell wird die global gemittelte Temperaturänderung an der Erdoberfläche bei Energiegleichgewicht und – in Kopplung mit einem ozeanischen Energiebilanzmodell – bei Verzögerung durch den Ozean berechnet (vgl. Abb. 9). Die verzögerte Berechnung ermittelt also die realistische Oberflächentemperatur, während das Strahlungskonvektionsmodell allein die schon jetzt angelegte aber wegen des Verzögerungseffektes des Ozeans erst im Laufe der nächsten Jahrzehnte sich einstellende Temperatur widerspiegelt. Wird beispielsweise eine festgelegte Erwärmungsgrenze durch eine berechnete Temperaturänderung überschritten, dann wird zu den Ausgangsszenarien zurückgegangen, um die Emissionsraten der einzelnen Treibhausgase entsprechend zu verändern. Wegen der nichtlinearen Wechselwirkungen im Klimasystem ist es nicht möglich, einfache Prozentänderungen in den Emissionsraten vorzunehmen und daraus ebenso große Änderungen in den Konzentrationen und Temperaturen abzuleiten. Im Gegenteil, bei jeder Änderung eines Parameters muß das gesamte in Abbildung 9 dargestellte System durchlaufen werden. Ergebnisse der Szenarienrechnungen mit vereinfachten Klimamodellen werden in Nr. 3 dargestellt.

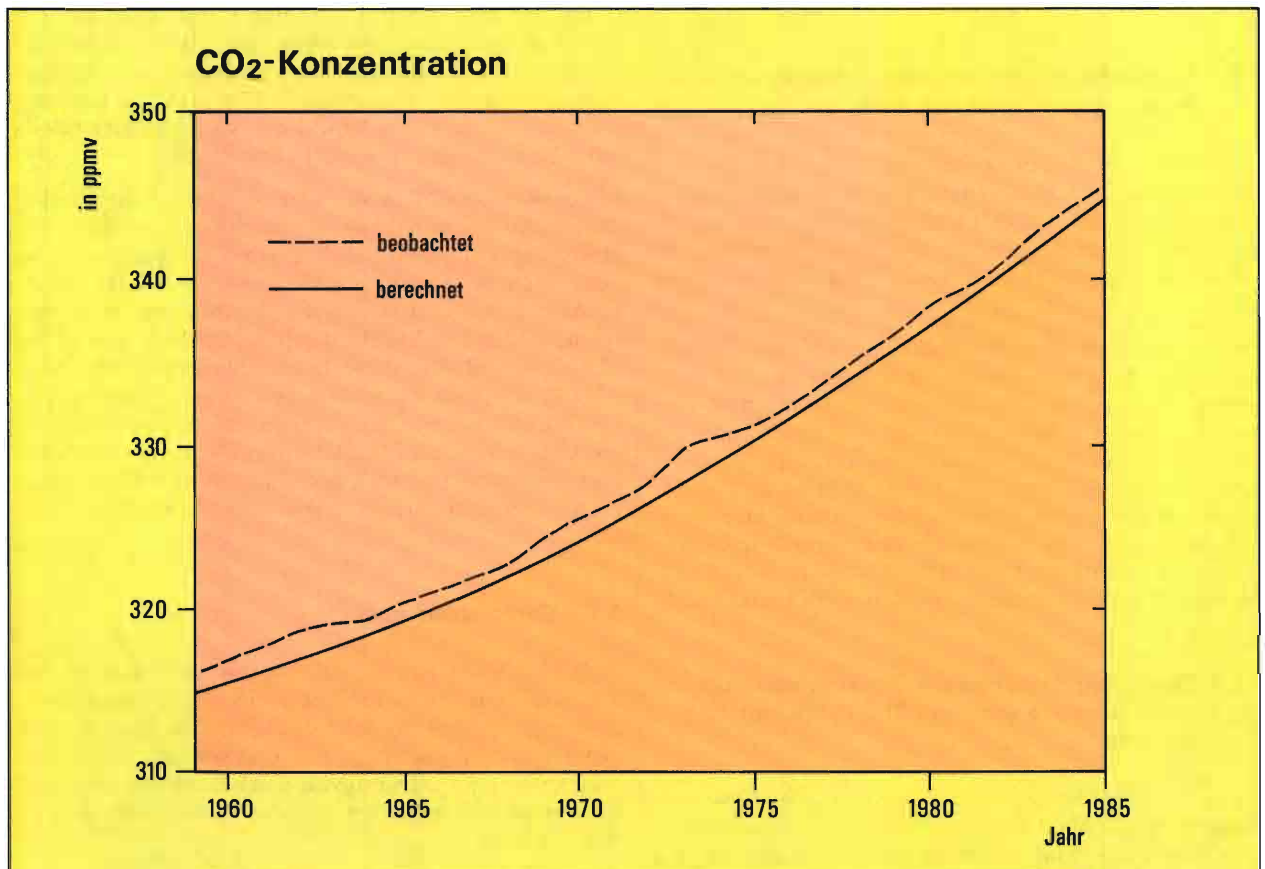


Abb. 10: Vergleich von beobachteten (Mauna Loa, Hawaii) und aus Emissionen berechneten atmosphärischen CO<sub>2</sub>-Konzentrationen von 1959 bis 1985 (39).

**2.1.7 Modellgütetest**

Um die Güte der Modelle beurteilen zu können, müssen sie mit den beobachteten Daten verglichen werden. Diese Modellvalidationen scheitern häufig daran, daß keine repräsentativen und langen Meßreihen zur Verfügung stehen. Hier werden Vergleiche für die Konzentrationen von CO<sub>2</sub>, FCKW 11, 12, 113, H-FCKW 22 sowie Tetrachlorkohlenstoff und Methylchloroform und für die global gemittelte Bodentemperatur vorgestellt. Aus Mangel an zuverlässigen Emissionsdaten wurden keine Werte für N<sub>2</sub>O und CH<sub>4</sub> für die Zeitperiode vor 1985 berechnet. Für die Berechnung des Strahlungsantriebes und der Temperaturänderungen durch diese beiden Gase wurde von den nach Wigley (37) berechneten Werten ausgegangen.

**– Konzentration**

In Abbildung 10 wird eine CO<sub>2</sub>-Meßreihe (38) mit den Ergebnissen des Kohlenstoffkreislaufmodells verglichen. Das Modell berechnet über den gesamten Zeitraum geringfügig zu niedrige Werte. Insgesamt ist die Übereinstimmung sehr gut.

Der Vergleich für die FCKW sowie Tetrachlorkohlenstoff und Methylchloroform ist in Abbildung 11 dargestellt. Die Beobachtungen sind einem Bericht des World Resources Institute (40) entnommen. Für FCKW 11 und FCKW 12 sowie H-FCKW 22 liegen die berechneten Werte unter den beobachteten, für FCKW 113, Tetrachlorkohlenstoff und Methylchloroform (bis auf 1978) darüber. Insgesamt ist die Übereinstimmung recht gut.

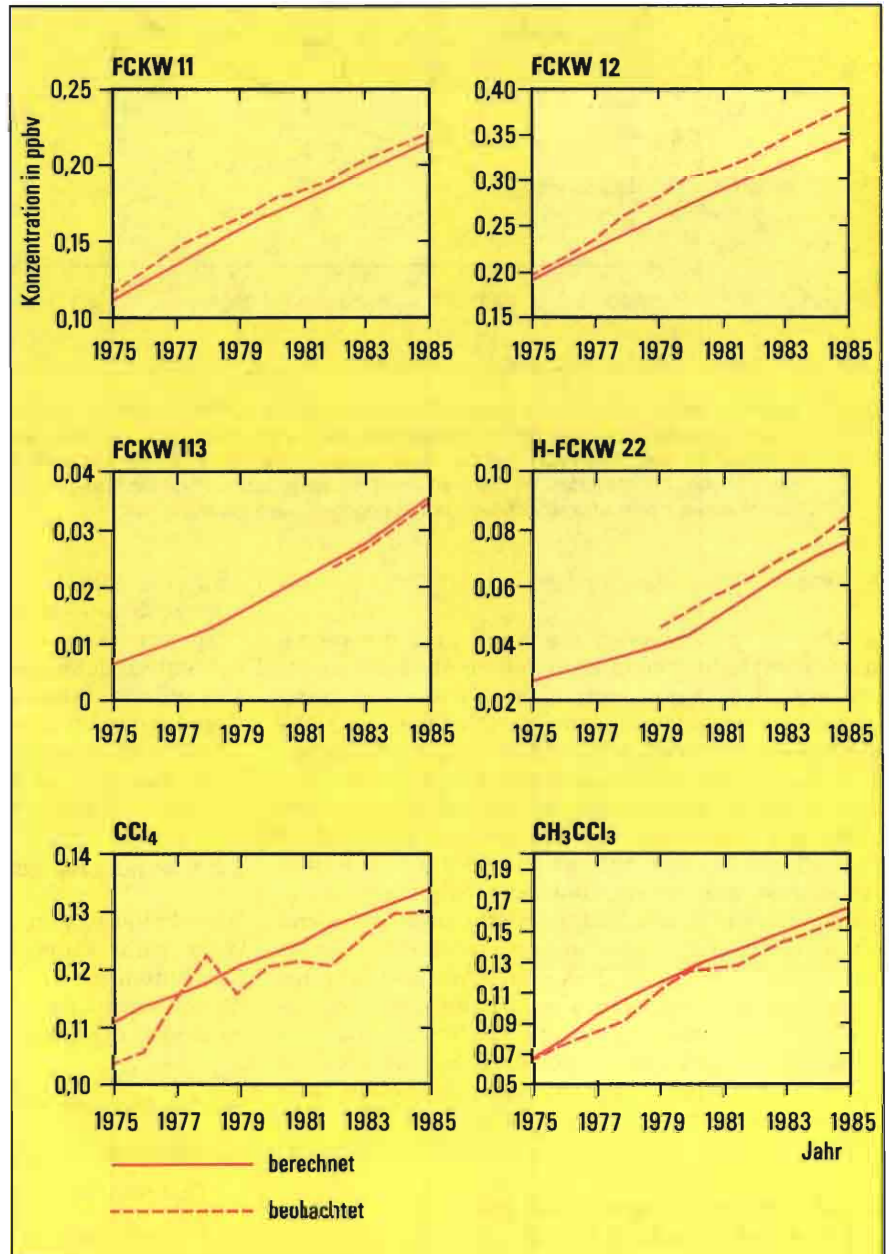


Abb. 11: FCKW-Konzentration (41).  
Vergleich von beobachteten und aus Emissionen berechneten globalen atmosphärischen FCKW-Konzentrationen von 1975 bis 1985.

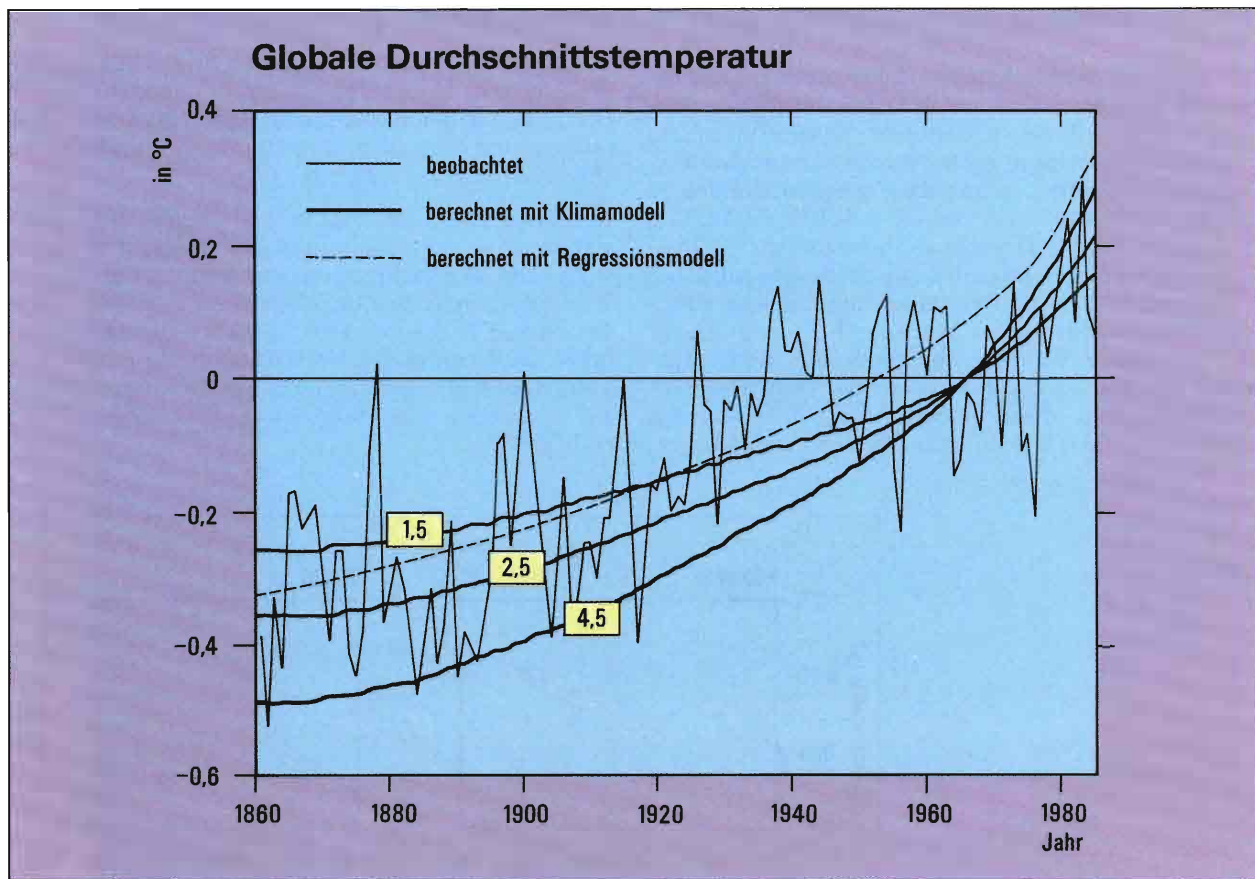


Abb. 12: Beobachtete und berechnete globale Oberflächentemperatur dargestellt als Abweichung vom Mittel 1950 – 1979 (44). Die dünne gezackte Linie spiegelt den natürlichen und zusätzlichen Treibhauseffekt wieder. Die dicken durchgezogenen Linien beruhen auf den Wirkungen von 14 Treibhausgasen, berechnet für Klimamodellsensitivitäten von 1,5, 2,5 und 4,5°C. Die gestrichelte Linie stellt das mit Hilfe von multiplen statistischen Regressionsmodellen aus den beobachteten Temperaturdaten der Nordhemisphäre herausgefilterte anthropogene Spurengassignal dar.

## – Temperatur

In Abbildung 12 werden die Anomalien der global gemittelten Lufttemperatur in Bodennähe (42) mit denen der berechneten verglichen. Für die Rechnung sind drei verschiedene Klimasensitivitäten bei  $\text{CO}_2$ -Verdoppelung, nämlich 1,5, 2,5 und 4,5°C, angenommen worden. Wenn man bedenkt, daß die berechneten Temperaturkurven nur die Wirkung der 14 betrachteten Treibhausgase widerspiegeln, während die beobachtete Kurve nicht nur alle natürlichen Klimavariationen, sondern auch noch alle möglichen zusätzlichen anthropogenen Einflüsse mit einschließt, dann zeigen die deutlich erkennbaren Trends eine bemerkenswerte Ähnlichkeit. Das von Schöwiase (43) aus Temperaturbeobachtungen mit Hilfe von Regressionsmodellen herausgefilterte Treibhausgas signal bezieht sich nur auf die Nordhemisphäre. Es liegt mit seiner gestrichelten Linie etwas auf der hohen Seite der Abschätzung.

### 2.2. Das dreidimensionale gekoppelte Ozean-Atmosphäre Modell

Die in Nr. 5 vorgestellten Ergebnisse der Szenarienrechnungen zum Treibhausgasproblem wurden mit einem Klimamodell erzielt, das in Hamburg gemein-

sam vom Max-Planck-Institut für Meteorologie und vom Meteorologischen Institut der Universität Hamburg entwickelt wurde. Das Modell besteht aus einem dynamisch gekoppelten System von Atmosphäre und Ozean. Die Einzelmodelle sowie die Methode der Kopplung werden im folgenden kurz beschrieben. Für den Ozean wurden zwei Modelle entwickelt, so daß auch Aussagen über die Modelabhängigkeit der Ergebnisse möglich sind.

#### 2.2.1 Atmosphärisches Zirkulationsmodell (ECHAM)

Das Modell basiert in seiner Grundstruktur auf dem Wettervorhersagemodell des Europäischen Zentrums für Mittelfristige Wettervorhersage (ECMWF) in Reading/England (45). Es wurde in Hamburg zum Klimamodell erweitert (46).

Die Modellgleichungen sind als Vorhersagegleichungen für folgende Klimavariablen formuliert:

- Windgeschwindigkeit
- Temperatur
- Wasserdampfgehalt
- Wolkenwassergehalt
- Bodendruck (als Maß für die Masse der Atmosphäre)

Die Grundgleichungen, die auf bekannten physikalischen Prinzipien wie der Erhaltung von Masse, Energie und Impuls beruhen, werden mit Hilfe mathematischer Näherungsverfahren gelöst. Dazu gehört zunächst eine geeignete räumliche Einteilung: Alle Variablen werden an Schnittpunkten von Längen- und Breitenkreisen auf der Erde definiert, und zwar in einem Gitternetz mit einer Maschenweite von durchschnittlich 5,6 Grad. Dies entspricht einem Gitterabstand von maximal 652 km.

Nach oben wird die Atmosphäre bis zu einer Höhe von etwa 30 km in 19 Schichten unterteilt, deren Mächtigkeit mit der Höhe zunimmt (60 m in Erdbodennähe bis zu einigen Kilometern in der Stratosphäre). An den Punkten des Modellgitters werden die Gleichungen mit einem Zeitschritt von 40 Minuten gelöst. Dazu sind eine Reihe von Parametern vorzugeben, die vom Modell nicht berechnet werden. Dies sind Eigenschaften der Erdoberfläche (Küstenlinien, Gebirge, Inlandeis, Vegetation, Reflexionsvermögen), astronomische Größen (Solarkonstante, Bahn und Rotationsperiode der Erde usw.) sowie die Konzentrationen strahlungsaktiver Gase und Teilchen in der Atmosphäre, soweit sie nicht, wie Wasserdampf und Wolkenwasser, berechnet werden. Das gilt für  $\text{CO}_2$ ,  $\text{O}_3$ , und Aerosolteilchen.

Das Hauptproblem bei der Modellentwicklung besteht darin, diejenigen Prozesse zu formulieren (parameterisieren), die vom Modellgitter nicht oder nur sehr grob erfaßt werden können, wie zum Beispiel die Absorption von Strahlung durch Gase und Aerosole oder die Phasenübergänge des Wassers wie Kondensation oder Verdunstung.

Im ECHAM-Modell werden folgende Prozesse parameterisiert:

- Strahlungsprozesse: Absorption und Streuung von Sonnenstrahlung sowie Absorption und Emission der Wärmestrahlung durch Wasserdampf, Wolkenwasser sowie bei vorgegebener Verteilung durch Kohlendioxid, Ozon und Aerosolteilchen. Die Berechnung erfolgt mit Hilfe „breitbandiger“ Modelle (47), wobei die Sonnenstrahlung (0,2 bis 4  $\mu\text{m}$  Wellenlänge) durch vier Spektralintervalle und die Wärmestrahlung (4 bis 100  $\mu\text{m}$ ) durch sechs Intervalle angenähert wird. Berücksichtigt wird dabei auch der Tages- und Jahresgang der Sonne.
- Wolken- und Niederschlagsprozesse werden mit Hilfe einer Bilanzgleichung für den Wolkenwassergehalt berechnet (48), wobei auch Annahmen über die kleinräumige Wolkenbildung unterhalb der Gitterauflösung gemacht werden. Bildung und weiteres Wachstum sowie die Auflösung von Wolken durch Verdunstung der Wolkentröpfchen und Niederschlag sind Bestandteil der Bilanzgleichung für Wolkenwasser. Der Wolkenwassergehalt wiederum verändert die Strahlungseigenschaften der Wolken wie Absorption, Transmission und Rückstreuung.
- Turbulente Diffusion von Impuls, Wärme und Wasserdampf in der Vertikalen wird nach einem von Louis (49) entwickelten Verfahren beschrieben: Die Übertragung von Wasserdampf durch Verdun-

stung von der Oberfläche sowie von Wärme von oder zu der Oberfläche und von Impuls an die Meeresoberfläche folgt der sogenannten Monin-Obukhov'schen Ähnlichkeitstheorie, die universelle Profildfunktionen für die unterste atmosphärische Grenzschicht erlaubt. Der vertikale Transport innerhalb der gesamten Grenzschicht (typischerweise 0,5 bis 1,0 km mächtig) wird durch einen Gradientansatz mit einem stabilitätsabhängigen turbulenten Diffusionskoeffizienten betrieben. Die Intensität des vertikalen Austausches hängt außer von Wind, Temperatur, Wasserdampfgehalt, Wolken und Wassergehalt des Erdbodens auch von der Rauigkeit der Erdoberfläche ab, die selbst vom Bewuchs und der Topographie sowie über dem Ozean auch von der Stärke des Windes (Wellenbildung) abhängt.

- Konvektive Austauschprozesse werden parameterisiert. Bei labiler Dichteschichtung wird ein vertikaler Austausch von Wärme und Wasserdampf durch Konvektionswolken simuliert, die bis in große Höhen, im Extremfall bis zur Tropopause reichen können und somit für eine erneute Stabilisierung der gesamten Troposphäre sorgen. Der Transport durch Konvektion hängt nicht nur von der Instabilität der Schichtung ab, sondern auch vom vertikalen Wasserdampffluß durch die Wolkenbasis.
- Erdbodenprozesse, also Wärme- und Wassertransport im Erdboden, werden mit einem separaten Bodenmodell gerechnet, das einen ähnlichen Schichtenaufbau hat wie das Atmosphärenmodell. Die oberen Erdbodenschichten werden relativ dünn gewählt (einige Zentimeter), um den tageszeitlichen Gang der Bodenerwärmung korrekt modellieren zu können. Die jahreszeitliche Temperaturwelle reicht bis in einige Meter Tiefe, so daß die Schichteinteilung vergrößert werden kann (einige Meter dick). Am unteren Bodenmodellrand, in einer Tiefe von 10 m, wird ein verschwindender Bodenwärmefluß angenommen, so daß das Modell energetisch abgeschlossen ist.
- Der Wassertransport im Erdbodenmodell wird durch Prozesse wie Niederschlag, Schneeschmelze, innerer und Oberflächenabfluß sowie Verdunstung ohne und mit Pflanzen bestimmt. Dabei wird auch die Benetzung der Vegetation beachtet. Die Abflußmenge hängt außer vom Niederschlagsangebot auch von einer empirischen Funktion des Wassergehaltes im Erdboden ab. Oberhalb einer maximalen Aufnahmekapazität (20 cm Wassersäule) wird jedes überschüssige Wasser aus Niederschlag oder Schneeschmelze in die Flüsse geleitet und mit entsprechender Zeitverzögerung den Ozeanen zugeführt.

## 2.2.2 Das erste ozeanische Zirkulationsmodell (LSG)

Ebenso wie das atmosphärische Modell beruht auch eines der beiden ozeanischen Zirkulationsmodelle, das LSG-Modell (Large-Scale Geostrophic (50)) auf einem System gekoppelter Differentialgleichungen, die numerisch in einem dreidimensionalen Gitter ge-

löst werden. Die horizontale Maschenweite beträgt 5 Grad, ähnlich wie bei dem atmosphärischen Zirkulationsmodell. Der gesamte Ozean wird in elf Schichten eingeteilt. Küstenlinien und Topographie des Ozeanbodens werden – im Rahmen der Modellauflösung – realistisch vorgeschrieben.

Die Grundvariablen des Modells sind der dreidimensionale Geschwindigkeitsvektor, die Temperatur und der Salzgehalt. In der obersten Modellschicht wird die Bildung von Meereis aufgrund der Energiebilanzmethode simuliert: Eis bildet sich oder schmilzt, je nachdem ob die Energiebilanz negativ oder positiv ist. Transport und Verformung des Meereises durch Wind und Meeresströmungen werden nicht betrachtet. Temperatur und Salzgehalt werden überwiegend durch Advektion mit der mittleren Strömung geändert. Kleinskalige Transportprozesse durch turbulente Diffusion und Konvektion werden parameterisiert. Die Konvektion ist vor allem für die Bildung von Tiefenwasser in hohen Breiten wichtig.

Im LSG-Modell werden die sich schnell ausbreitenden Schwerewellen herausgefiltert. Damit wird erreicht, daß das Modell auch bei großen Zeitschritten (von einem Monat) stabile Lösungen liefert, während traditionelle Ozeanmodelle einen Zeitschritt von einigen Stunden benötigen. Das LSG-Modell ist somit insbesondere für die Simulation von längerfristigen Klimaschwankungen geeignet.

Im ungekoppelten Modus wird das Modell durch klimatologische Randwerte an der Meeresoberfläche angetrieben: Windschubspannung, Temperatur und Salzgehalt.

### 2.2.3 Das zweite ozeanisches Zirkulationsmodell (OPYC)

Das OPYC-Modell (Ocean Model in Isopycnic Coordinates) (51) basiert – ähnlich wie das atmosphärische ECHAM-Modell – auf einem System gekoppelter Differentialgleichungen, die numerisch gelöst werden. Die horizontale Maschenweite beträgt etwa 2,8 Grad und ist damit wesentlich feiner als die des Atmosphärenmodells. In der Vertikalen werden „isopyknische Koordinaten“ verwendet, das heißt Flächen gleicher potentieller Dichte sind Koordinatenflächen, die nicht ortsfest sind. Der tiefe Ozean wird in acht Schichten eingeteilt. Die Verwendung isopyknischer Koordinaten hat den Vorteil, daß trotz einer relativ kleinen Zahl von Schichten starke Gradienten von Temperatur und Salzgehalt, wie sie beispielsweise in der Temperatur-Sprungschicht vorkommen, realistisch simuliert werden. Aus Salzgehalt und Temperatur wird die Dichte bestimmt. Turbulente und konvektive Vermischungsprozesse werden parameterisiert.

Der obere Teil des Ozeans, die Deckschicht, wird als getrenntes Teilmodell behandelt. Die Tiefe der Deckschicht wird durch den Windschub an der Meeresoberfläche, durch Auftriebskräfte, Dissipation von turbulenter kinetischer Energie, Einmischen von Wasser aus der Sprungschicht durch Turbulenz sowie durch die Eindringtiefe der Sonnenstrahlung bestimmt. Die Kopplung mit dem tiefen Ozean erfolgt ähnlich wie die Kopplung zweier isopyknischer Schichten.

Die dritte Komponente des OPYC-Modells ist ein dynamisches Meereismodell (52). In diesem Modell wird das Eis nicht nur als Ergebnis der lokalen Energiebilanz gebildet oder geschmolzen, sondern auch durch Wind und Meeresströmungen verfrachtet und deformiert. Damit können offene Stellen im Eis durch Strömungsdivergenz ebenso simuliert werden wie Preßrücken durch das Übereinanderschieben von Eisschollen.

Im ungekoppelten Modus wird das OPYC-Modell durch klimatologische Randbedingungen angetrieben: Windschubspannung und Wärme-flüsse an der Meeresoberfläche sowie den Salzgehalt des Oberflächenwassers. Die zeitliche Integration erfolgt mit einem Zeitschritt von einem Tag.

### 2.2.4 Kopplungsmethode

Die Modelle werden zeitlich synchron gekoppelt. Die vom Ozeanmodell berechnete Oberflächentemperatur wird ohne zeitliche Verzögerung an das Atmosphärenmodell weitergegeben, das seinerseits die vom Ozeanmodell benötigten Flüsse der Strahlungsenergie und der fühlbaren Wärme, des Impulses und des Frischwasser als Differenzen von Niederschlag und Verdunstung berechnet. Hinzu kommt der Abfluß von den Kontinenten.

Wegen der systematischen Fehler der Einzelmodelle entsprechen die Flüsse von Energie, Impuls und Wasser an der Meeresoberfläche im gekoppelten Modell nicht denen der ungekoppelten Modelle, die mit klimatologischen, also „richtigen“ Randbedingungen angetrieben werden. Die Folge ist eine Drift des gekoppelten Systems in einen „falschen“ Klimazustand. Mit Hilfe der sogenannten Flußkorrekturmethode kann diese Klimadrift drastisch reduziert werden (53). Dabei werden zu den einzelnen Flüssen Korrekturterme addiert, die zwar räumlich variabel aber zeitlich konstant sind – abgesehen von einer vorgeschriebenen jahreszeitlichen Schwankung. Damit bleibt die interne Klimavariabilität des gekoppelten Modells voll erhalten. Externe Klimaänderungen – bedingt zum Beispiel durch die Erhöhung der atmosphärischen CO<sub>2</sub>-Konzentration – werden im Idealfall als Anomalien gegenüber dem Referenzklima des ungekoppelten Modells (also dem heutigen Klima) simuliert.

### 2.2.5 Modellgütetest

Ein quantitativer Vergleich von modelliertem und beobachtetem Klima ist aus zwei Gründen notwendig. Zum einen ist eine Verbesserung der Modelle nur dann möglich, wenn die Fehler und ihre Ursachen bekannt sind. Zum anderen ist eine Fehleranalyse nötig, um die Glaubwürdigkeit von Modellaussagen zur zukünftigen Klimaentwicklung abzuschätzen.

Die wertvollste Basis für die Beurteilung von Klimasimulationen des heutigen Klimas liefern die täglichen Wetterbeobachtungen, aus denen der Zustand der Atmosphäre bis zu einer Höhe von etwa 40 km analysiert werden kann. Dabei werden die Meßwerte üblicher-



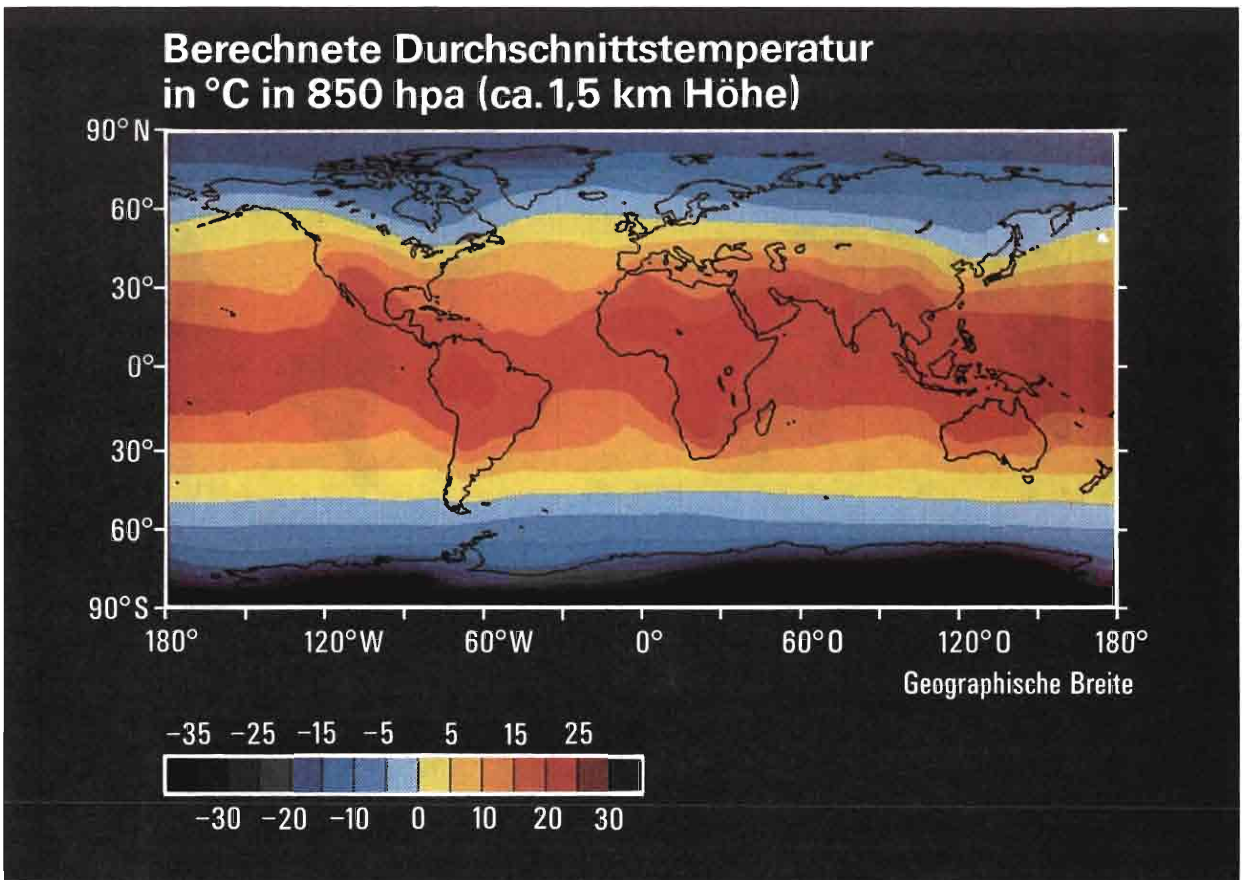
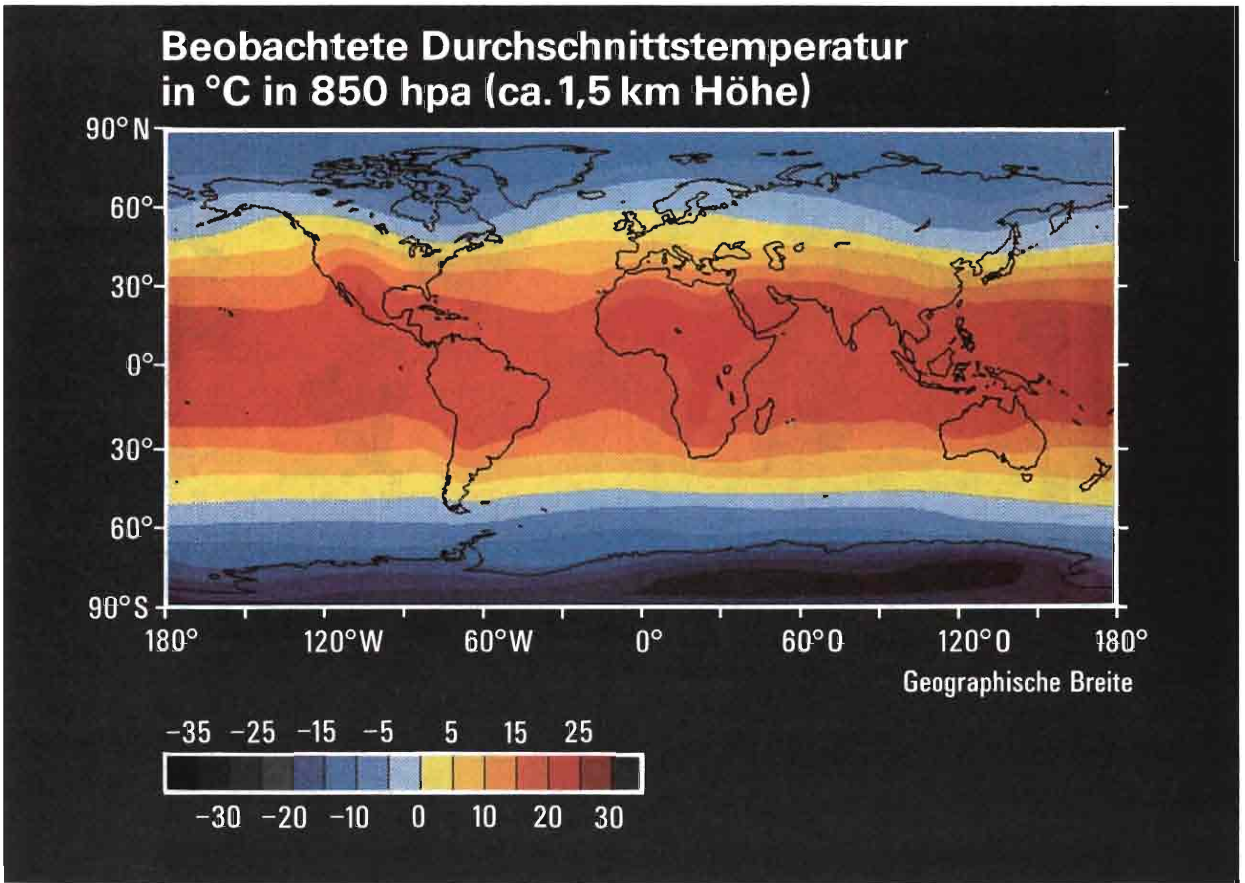


Abb. 13: Jahresmittel der Lufttemperatur im 850 hPa-Niveau (etwa 1,5 km Höhe)  
 a. Analysen des „Europäischen Zentrums für Mittelfristige Wettervorhersage“ für den Zeitraum 1979 bis 1988.  
 b. Modellsimulation bei vorgegebener Meeresoberflächentemperatur für den gleichen Zeitraum

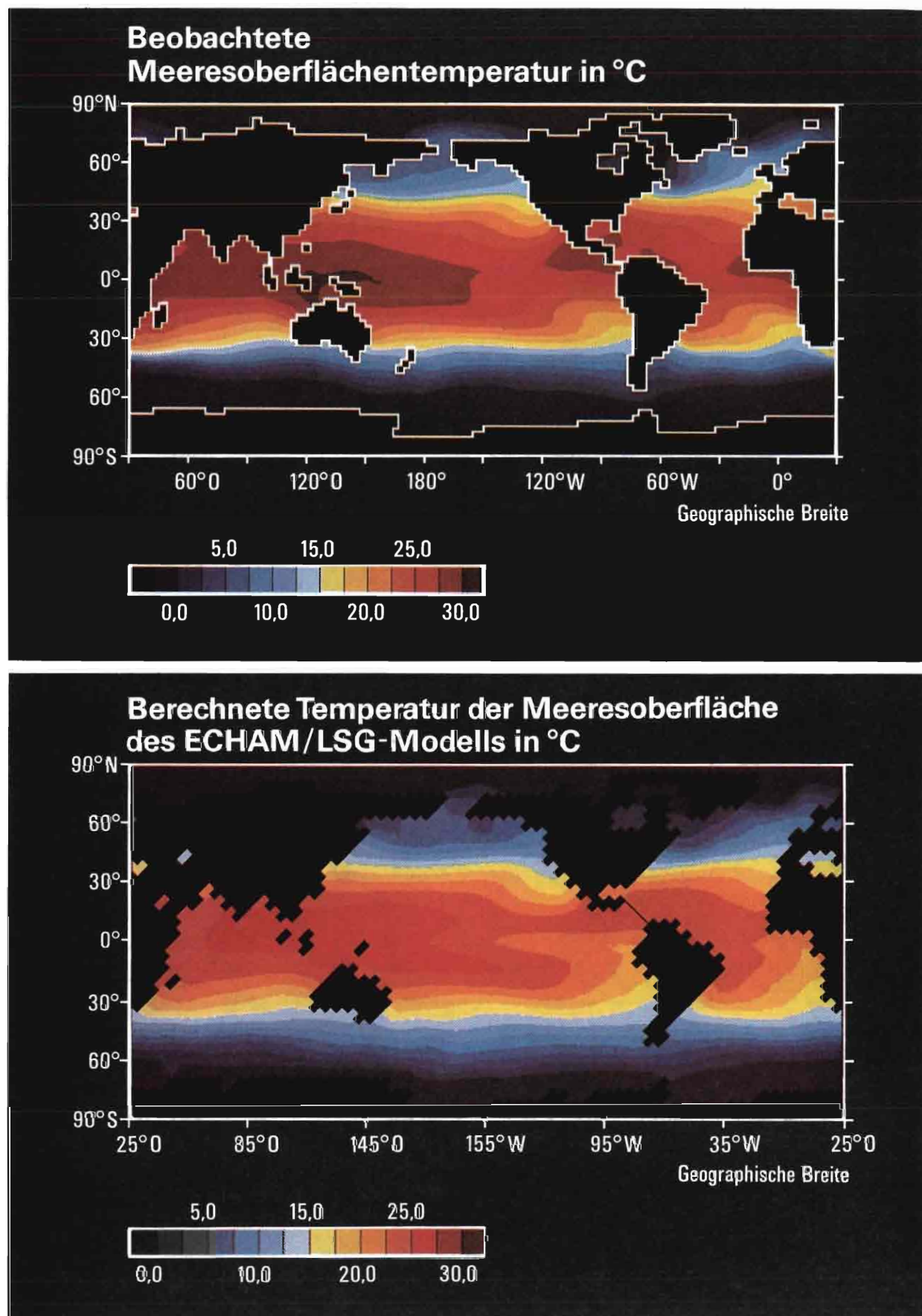
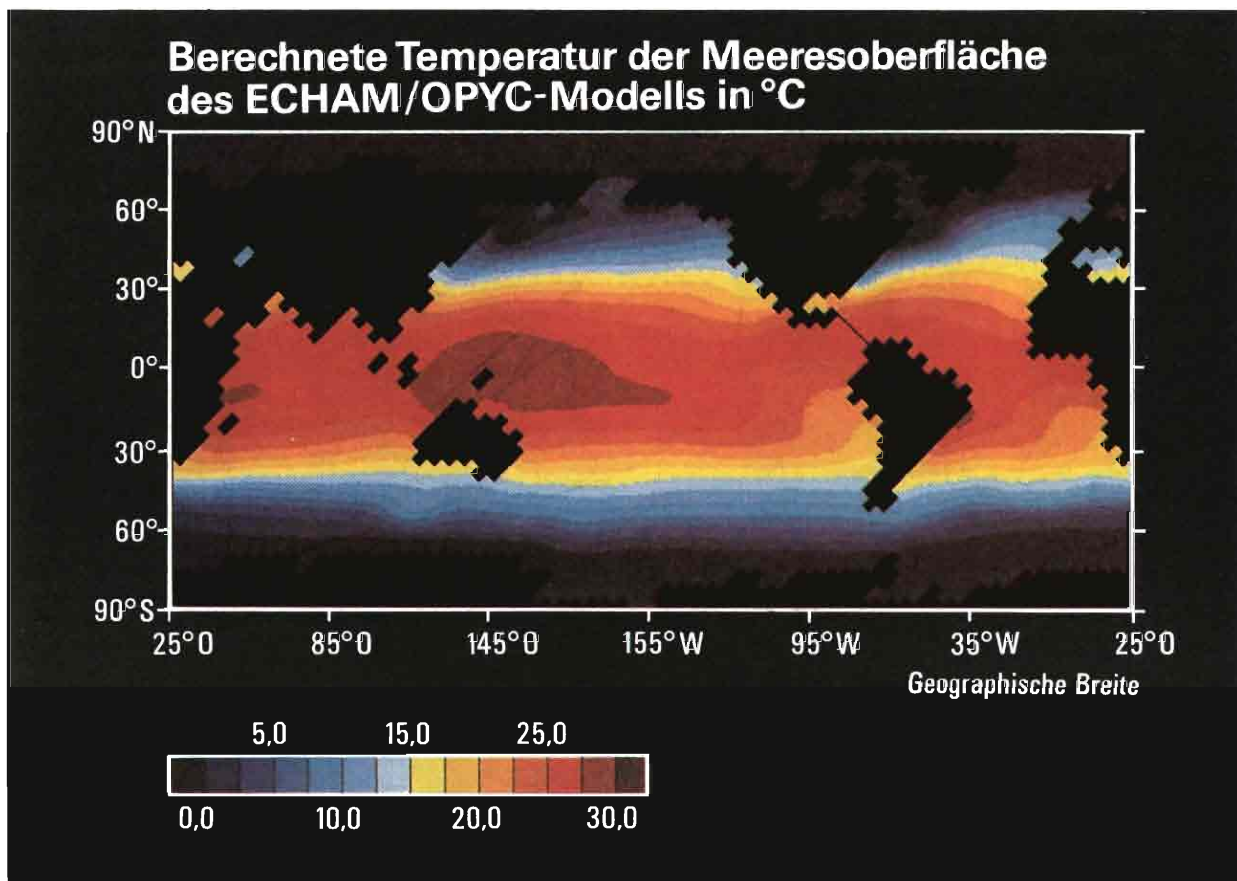


Abb. 14: Jahresmittel der Meeresoberflächentemperatur

a. Beobachtete Klimatologie (54)

b. Modellsimulation: ECHAM/LSG, 29. bis 38. Jahr des Kontrollaufs



c. Modellsimulation: ECHAM/OPYC, 21. bis 30. Jahr des Kontrolllaufs

weise auf Flächen gleichen Luftdrucks interpoliert. Als Beispiel sei die globale Verteilung der Jahresmitteltemperatur im Niveau 850 hPa-Niveau (etwa 1,5 km Höhe, repräsentativ für die planetarische Grenzschicht) gezeigt. Die beobachtete Verteilung für den Zeitraum 1979 bis 1988 ist in Abbildung 13 wiedergegeben. Die Abbildung 13 zeigt die simulierte Verteilung im ungekoppelten Atmosphäre-Modell, wobei als untere Randbedingung die beobachtete Meeresoberflächentemperatur für den gleichen Zeitraum vorgeschrieben wurde.

Das ECHAM-Modell ist offensichtlich in der Lage, die Strukturen der beobachteten Temperaturverteilung gut zu simulieren. Die größten Fehler treten in den Polarregionen auf, die im Modell generell zu kalt sind (etwa 5 Grad in der Arktis und mehr als 10 Grad in der Antarktis). In den Tropen sind die ozeanischen Gebiete etwas zu kalt, während die kontinentalen Gebiete eher zu warm sind (zum Beispiel das Amazonasgebiet).

Eine geeignete Größe für die Beurteilung gekoppelter Modelle von Atmosphäre und Ozean ist die Meeresoberflächentemperatur. Einerseits ist die globale Verteilung dieser Größe sehr viel besser bekannt als jede andere ozeanische Variable und ein besonders wichtiger Klimaparameter. Andererseits werden Fehler der Einzelmodelle besonders an der Grenzfläche beider Medien sichtbar. Eine direkte Kopplung der Einzelmodelle führt regional zu großen Fehlern bis etwa 5

Grad. Die Einführung einer „Flußkorrektur“ (vgl. Nr. 2.2.4) reduziert diese Fehler jedoch erheblich.

In Abbildung 14 wird (a) die beobachtete Verteilung der jährlich gemittelten Meeresoberflächentemperatur (b) mit der Simulationen der Modelle ECHAM/LSG sowie (c) ECHAM/OPYC bei Anwendung der Flußkorrektur verglichen. Obwohl das gleiche Atmosphärenmodell benutzt wurde, ist die Fehlerstruktur der Modelle unterschiedlich. Die tropischen Ozeane werden im LSG-Modell um etwa 1 bis 2 Grad zu kalt simuliert und im OPYC-Modell um fast den gleichen Betrag zu warm. Fehler gleicher Größe treten auch in höheren Breiten auf. Insgesamt sind die südlichen Ozeane etwas zu kalt (besonders OPYC) und die nördlichen etwas zu warm, vor allem der Nordpazifik. Hier ist insbesondere auch eine Abschwächung der Temperaturdifferenz zwischen Äquator und Pol erkennbar. Abgesehen von diesen systematischen Fehlern wird die Grundstruktur der geographischen Verteilung der Temperatur von beiden Modellen sehr gut reproduziert.

Bei anderen Klimaparametern, wie zum Beispiel der Niederschlagsmenge, ist die Übereinstimmung qualitativ vorhanden, jedoch quantitativ teilweise unbefriedigend. Die Niederschlagsgürtel dagegen sind richtig getroffen, und auch der globale Wasserkreislauf ist korrekt beschrieben. Damit stehen die Modelle für Szenarienrechnungen zur Verfügung, deren Ergebnisse in den Temperaturen noch am sichersten

sein werden, aber schon in der groben regionalen Niederschlagsverteilung besonders vorsichtig interpretiert werden müssen.

### 2.3 Vergleich von Klimamodellergebnissen

Um das Vertrauen in die Klimamodellrechnungen zu erhöhen, ist es von Interesse, die bei gleichen Eingabeparametern mit unterschiedlichen Modellen berechneten Ergebnisse miteinander zu vergleichen.

#### 2.3.1 Vergleich von eindimensionalen Modellen untereinander

Im folgenden werden die Ergebnisse der IPCC-Berechnungen mit den Ergebnissen aus den Berechnungen der Enquete-Kommission verglichen. Die IPCC-Abschätzungen wurden mit einem eindimensionalen (1-D-)Energiebilanz-Klimamodell, das mit einem Aufquell-Diffusionsmodell des Ozeans gekoppelt ist (55), durchgeführt. Für die Berechnungen der Kommission wurde das Münstersche Klimamodell herangezogen, dessen wichtigster Bestandteil aus einem Box-Advektions-Diffusionsmodell (56) und einem global gemittelten 1-D-Energiebilanzmodell, besteht. Zusätzlich wurden Berechnungen mit dem Mainzer Chemie-Klimamodell durchgeführt (vgl. Abschnitt D, 3. Kap., Nr. 1.2.1). Die Konzentrationsdaten, die für  $\text{CO}_2$ ,  $\text{CH}_4$ ,  $\text{N}_2\text{O}$ , FCKW 11 und 12 sowie

H-FCKW 22 eingegeben wurden, wurden für die vier IPCC-Szenarien BAU (business-as-usual), Br, Cr und Dr für die Zeitperiode 1990 bis 2100 vom britischen Wetterdienst zur Verfügung gestellt, die Mainzer Rechnungen basieren auf gegebenen Emissionen derselben Quelle. Beim Mainzer Modell werden somit die Wechselwirkungen zwischen den einzelnen Gasen, die die Entwicklung der Konzentrationen beeinflussen, erfaßt.

In Abbildung 15 sind die mittleren globalen transienten Temperaturänderungen von vier IPCC-Szenarien für eine Klimasensitivität von  $2,5^\circ\text{C}$  für das IPCC- und das Münstersche Klimamodell sowie für eine Klimasensitivität von  $2,0^\circ\text{C}$  für das Mainzer Modell dargestellt. Das IPCC-Klimamodell berechnet für alle Szenarien die höchsten Werte, das Münstersche Klimamodell liegt im mittleren Bereich, und das Mainzer Chemie-Klimamodell mit der niedrigsten Klimasensitivität zeigt die niedrigsten Werte. Bei Szenario BAU wirken sich im Mainzer Modell die stark wachsenden Stickoxidemissionen auf der Nordhalbkugel aus, die über eine Erhöhung der OH-Konzentration den Methananstieg bremsen. Nimmt man die Stickoxidemissionen aus Szenario Br, kann Methan schneller steigen, somit wird der Treibhauseffekt stärker (gepunktete Kurve in Abbildung 15).

Die unterschiedlichen Modellergebnisse mögen zum Teil aus Unterschieden in den gewählten Modellparametern herrühren. Das IPCC-Klimamodell spezifiziert

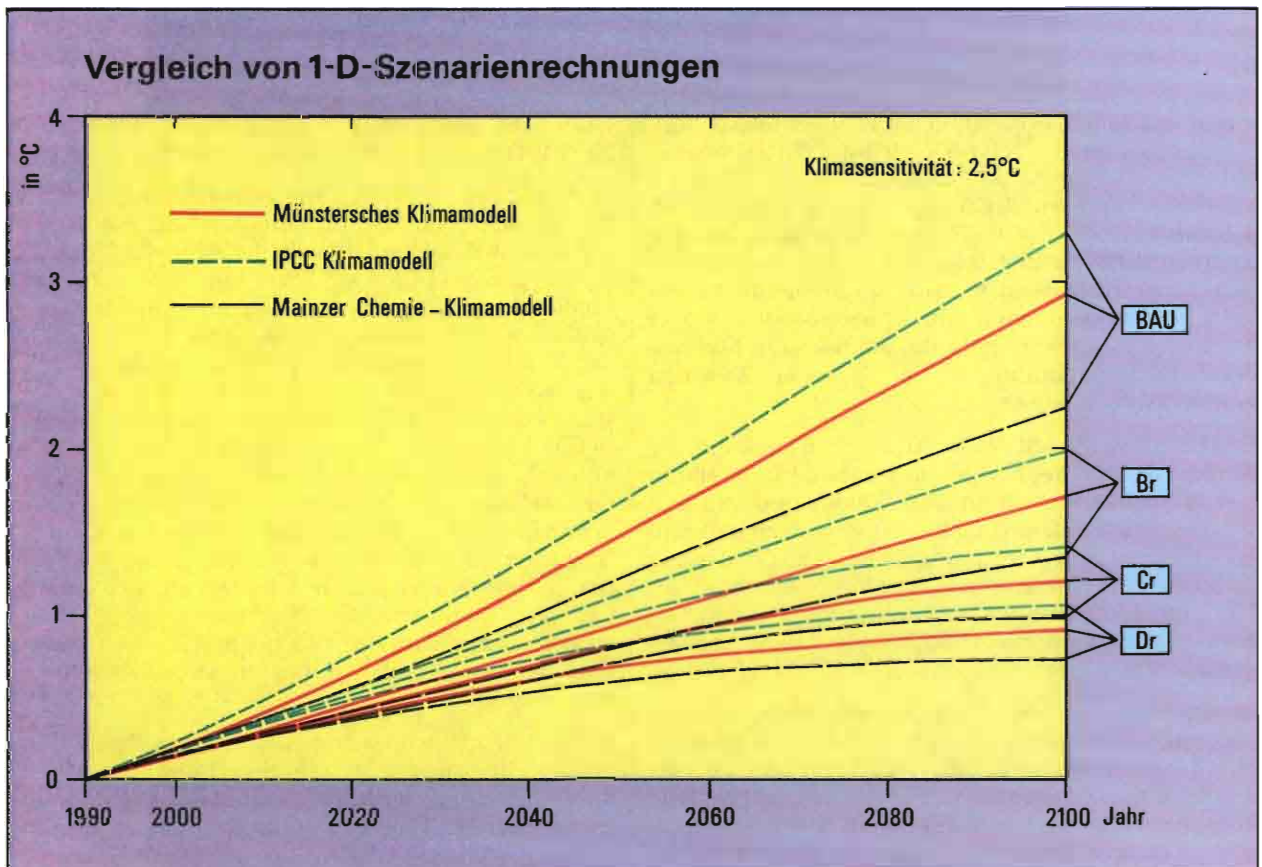


Abb. 15: Vergleich der mittleren globalen transienten Temperaturänderungen in unterschiedlichen Klimamodellen für die IPCC-Szenarien

für die Aufquellgeschwindigkeit  $w = 4$  m pro Jahr, für die vertikale Diffusivität  $K = 0,66$  cm<sup>2</sup> pro Sekunde, für die Tiefe der oberen Mischungsschicht  $h = 70$  m und für die Tiefe der Thermokline  $K/w = 520$  m. Das Münstersche Klimamodell hat die Eingabegrößen  $w = 4$  m pro Jahr,  $K = 1,27$  cm<sup>2</sup> pro Sekunde,  $h = 30$  m und für die Tiefsee  $d = 3790$  m. Diese Werte liegen alle im Bereich des Plausiblen. Anhand von Sensitivitätsstudien konnte gezeigt werden, daß die transiente Oberflächentemperatur nur geringfügig auf Änderungen von  $K$  und  $w$ , die nicht gut spezifiziert werden können, reagiert. Aus diesem Grunde lassen sich die Modellergebnisse gut vergleichen (57).

### 2.3.2 Vergleich von eindimensionalen mit dreidimensionalen Modellen

3-D-Modelle können Veränderungen im Klimasystem besser reproduzieren als 1-D-Modelle, da sie die Atmosphäre viel detaillierter modellieren. Während sich bisher Rechnungen mit 3-D-Klimamodellen auf einen etwa 50 m tiefen Ozean beschränkten und somit den Wärmetransport und die Wärmespeicherung im tieferen Ozean vernachlässigten, sind mit dem Hamburger 3-D-Klimamodell, das eine vollständige Zirkulation

der Atmosphäre mit einer vollständigen Ozean-Zirkulation koppelt, umfangreichere und wahrscheinlich auch realistischere Klimasimulationen möglich.

Die 3-D-Klimasimulationen sind sehr aufwendig und daher kostenintensiv. Deshalb wurden bisher mit dem Hamburger Klimamodell nur zwei Szenarien zeitabhängig gerechnet. Politische Entscheidungsträger müssen aber aus einer größeren Anzahl von Handlungsoptionen auswählen können, damit die Entscheidung besser konsensfähig ist. Das kann am besten von den weniger aufwendigen 1-D-Klimamodellen geleistet werden. Es wäre ideal, wenn die jeweiligen Stärken der beiden Modellhierarchien in wissenschaftlicher Kooperation für die Erarbeitung abgesicherter Modellergebnisse eingesetzt werden könnten. Dazu ist es zunächst erforderlich, die von den 1-D- und 3-D-Klimamodellen berechneten Ergebnisse miteinander zu vergleichen.

Für diesen Vergleich werden die gleichen Szenarien über den Anstieg der Konzentrationen von Treibhausgasen zugrundegelegt, um die mittleren globalen transienten Temperaturänderungen von 1985 bis 2015 zu berechnen, nämlich das hohe IPCC-Szenario BAU (business-as-usual) und das niedrige IPCC-Szenario Dr. Die Berechnungen wurden mit dem ein-

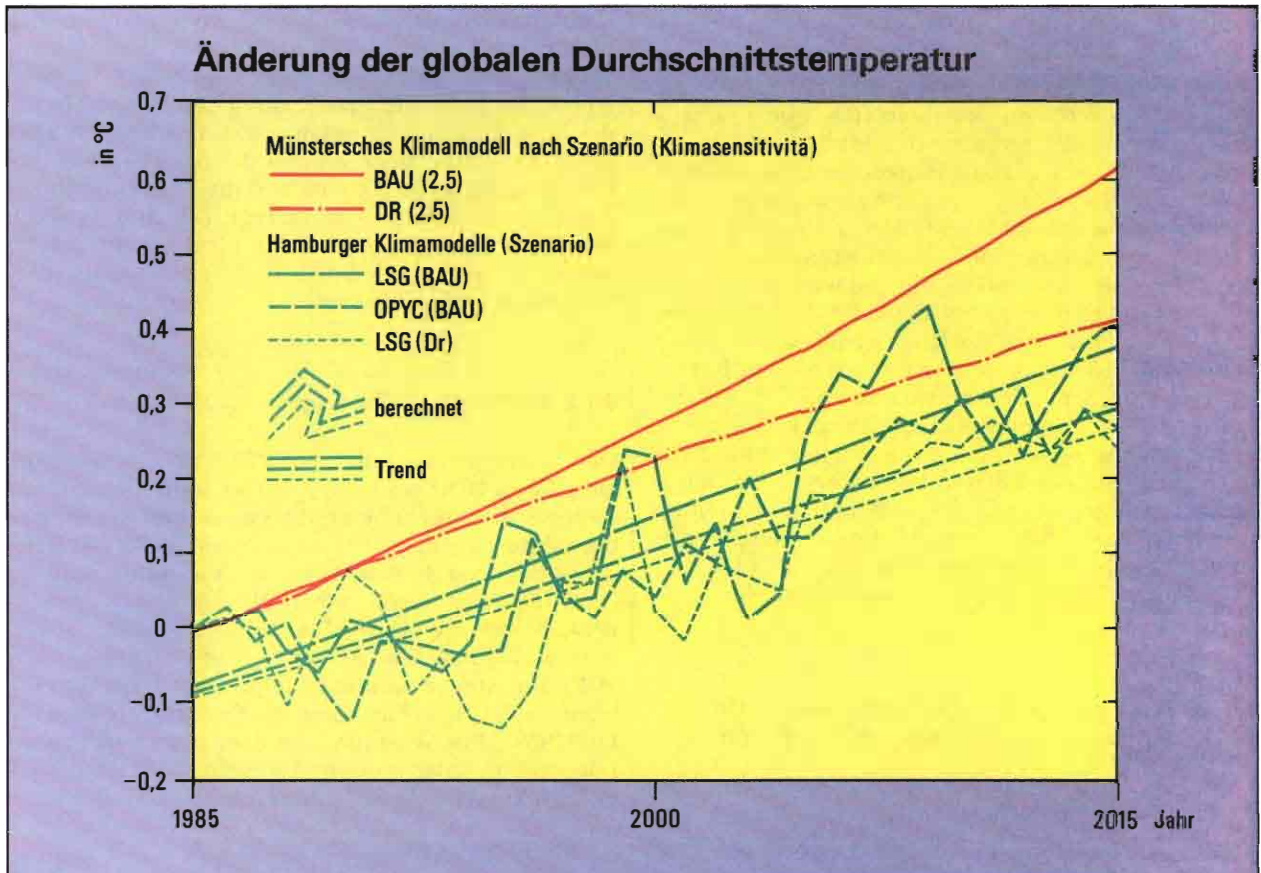


Abb. 16: Vergleich der mittleren globalen transienten Temperaturänderungen, berechnet mit dem 1-D-Münsterschen Klimamodell und dem 3-D-Hamburger Klimamodell für die IPCC-Szenarien BAU und Dr. Die Klimasensitivitäten (°C) sind in Klammern angegeben. Würde die Wirkung der Emissionen von Treibhausgasen auf den Temperaturanstieg vor 1985 im Hamburger Modell mit berücksichtigt, so würden die Ergebnisse beider Modelle sehr gut übereinstimmen.

mensionalen Münsterschen Klimamodell (vgl. Nr. 2.1) und dem dreidimensionalen Hamburger Klimamodell (vgl. Nr. 2.2) durchgeführt.

In Abbildung 16 sind die mit den unterschiedlichen Modellsystemen berechneten Temperaturverläufe und -trends von 1985 bis 2015 dargestellt. Das Münstersche Klimamodell rechnet hier für beide Szenarien mit einer Modellsensitivität von  $2,5^{\circ}\text{C}$ . Die Modellsensitivität der beiden Hamburger Modelle LSG und OPYC ist nicht genau bekannt, da bisher in den Kontrollläufen das neue Gleichgewicht noch nicht erreicht worden ist.

Das Münstersche Klimamodell errechnet für den gesamten Zeitraum etwas höhere Temperaturen als das Hamburger Modell, da das Hamburger Modell erst ab 1985 integriert wurde und folglich die zusätzliche Erwärmung durch die Ozeane, die auf die zunehmenden Konzentrationen von Treibhausgasen während der vergangenen Jahrzehnte zurückzuführen ist und erst zeitverzögert an die Atmosphäre abgegeben wird, hier noch nicht berücksichtigt ist. Würde dieser Effekt mit eingeschlossen, so dürfte die Erwärmung im Jahre 2015 um etwa  $0,3^{\circ}\text{C}$  höher liegen und dann mit den Ergebnissen des Münsterschen Klimamodells sehr gut übereinstimmen.

### 3. Ergebnisse aus eindimensionalen Szenarienrechnungen

Im folgenden werden die Ergebnisse dargestellt, die mit Hilfe des in 2.1 beschriebenen Münsterschen Klimamodells nach den Rahmendaten der Enquete-Kommission erzielt worden sind. Hauptzweck dieser Untersuchungen ist es, die Emissionsreduktionsziele, die von der Enquete-Kommission für die wichtigsten Treibhausgase empfohlen wurden, in ihrer Wirksamkeit zur Eindämmung des zusätzlichen Treibhauseffekts zu vergleichen und für den politischen Entscheidungsprozeß zu bewerten. Um die für die verschiedenen Treibhausgase unterschiedlichen Maßnahmen beurteilen zu können, wurden die in diesem Kapitel dargestellten Szenarien entwickelt (vgl. Nr. 1.1 und 1.2), welche die gegenwärtigen Entwicklungen einbeziehen und die Wirkungen möglicher zukünftiger Entwicklungen abschätzen. Des weiteren werden in Nr. 4 Szenarienrechnungen, die mit dem Mainzer Chemie-Klimamodell durchgeführt wurden, vorgestellt und in Nr. 5 Szenarienrechnungen, die mit dem Hamburger Klimamodell durchgeführt wurden.

#### 3.1 Die Wirksamkeit der EK-Empfehlungen zur Reduktion der Emissionen von FCKW und H-FCKW

Würden die zulässigen Ausnahmeregelungen des Montrealer Protokolls in seiner 1. Fassung von 1987 ausgeschöpft, so würde sich die FCKW-Konzentration in der Atmosphäre bis 2100 gegenüber 1985 nahezu vervierfachen. Im Juni 1990 wurden deshalb auf der 2. Vertragsstaatenkonferenz des Montrealer Protokolls in London strengere Vereinbarungen getroffen. Im

folgenden werden die Londoner Beschlüsse und die weitergehenden Empfehlungen der Enquete-Kommission auf ihre Wirksamkeit zur Reduzierung der Emissionen und Konzentrationen in der Atmosphäre sowie zur Eindämmung des zusätzlichen Treibhauseffekts untersucht. Die Auswirkungen auf den Abbau des stratosphärischen Ozons werden in Abschnitt D behandelt.

#### 3.1.1 EK-Szenario London

Dieses Szenario geht von dem realistischen Fall aus, daß die auf der 2. Vertragsstaatenkonferenz des Montrealer Protokolls in London gesetzlich verankerten Ausnahmeregelungen ausgeschöpft werden. Der Ausstieg aus der FCKW-Produktion erfolgt dann erst im Jahre 2010. Tabelle 5 zeigt für FCKW 11 und 12, daß die FCKW-Emissionen sogar erst kurz nach 2015 gänzlich aufhören, da ein großer Anteil der FCKW erst lange nach ihrer Produktion in die Atmosphäre emittiert werden. Die Konzentrationen in der Atmosphäre steigen zunächst noch weiter kräftig an und erreichen erst um die Mitte des nächsten Jahrhunderts wieder den gegenwärtigen Wert. Obwohl kurz nach 2015 keine FCKW mehr in die Atmosphäre emittiert werden, sinkt die Konzentration von FCKW 11 (Verweilzeit etwa 60 Jahre) bis 2100 nur um 48 Prozent und die von FCKW 12 (Verweilzeit etwa 130 Jahre) sogar nur um 33 Prozent.

Die teilhalogenierten H-FCKW werden durch das Montrealer Protokoll auch nach der 2. Vertragsstaatenkonferenz von London nicht kontrolliert. Deshalb wurde das Londoner Szenario mit den Vorstellungen des IPCC-Szenario Cr gekoppelt. Danach würden bis zum Jahre 2100 gegenüber 1985 die H-FCKW 22-Emissionen um das 33fache und die Konzentrationen sogar um das 66fache steigen (vgl. Tab. 5). Eine solch drastische Zunahme wäre sicher nicht akzeptabel. Im folgenden Szenario wird deshalb ein Ausstiegsvorschlag der USA aufgegriffen.

#### 3.1.2 EK-Szenario Washington

Der US-Vorschlag eines H-FCKW 22-Ausstiegs bis zum Jahre 2040 ergibt die in Tabelle 5 für einzelne Zeitperioden berechneten Emissions- und Konzentrationsänderungen. In diesem Szenario bleibt die Konzentration von H-FCKW 22 in den Anfangsjahren etwa auf dem gleich hohen Niveau wie im hohen IPCC-Szenario BAU. Die Maßnahmen greifen erst voll mit dem vollständigen weltweiten Ausstieg nach 2040. Die Kommission erachtet die Vorstellungen sowohl für die FCKW im Londoner Szenario als auch für H-FCKW 22 im Washingtoner Szenario als nicht ausreichend und macht die im EK-Szenario Bonn dargestellten Vorschläge zur Verschärfung.

#### 3.1.3 EK-Szenario Bonn

Das Montrealer Protokoll in der Fassung der 2. Vertragsstaatenkonferenz von London wird dahingehend

**Die Auswirkungen von Maßnahmen auf die globalen Emissions- und Konzentrationsänderungen von FCKW und H-FCKW (58)**

Szenario <sup>1)</sup>	Maßnahmen	FCKW 11 Emission (E) Konzentration (K)	Globale Änderung in Prozent bzw. × (6 × = 600%)					
			1985 bis 2000	1985 bis 2005	1985 bis 2010	1985 bis 2015	1985 bis 2050	1985 bis 2100
EK-London	Montrealer Protokoll <sup>2)</sup> <i>mit</i> Ausnahmeregelungen Ausstieg weltweit: 2010	E K	-50 +67	-60 +68	-77 +67	- 93 + 60	-100 + 1	-100 - 48
EK-Bonn	a) Montrealer Protokoll <sup>2)</sup> <i>ohne</i> Ausnahmeregelungen Ausstieg weltweit: 2000	E K	-64 +60	-78 +57	-87 +52	- 97 + 44	-100 - 10	-100 - 54
	b) Montrealer Protokoll <sup>2)</sup> <i>ohne</i> Ausnahmeregelungen Ausstieg: Bundesrepublik Deutschland: 1995; EG: 1997; weltweit: 2000	E K	-70 +52	-81 +49	-90 +43	- 98 + 36	-100 - 15	-100 - 57
EK-Brasilia	wie Bonn Ausstieg weltweit: 1997	E K	-72 +54	-80 +51	-89 +45	- 98 + 38	-100 - 14	-100 - 56
		FCKW 12						
EK-London	Montrealer Protokoll <sup>2)</sup> <i>mit</i> Ausnahmeregelungen Ausstieg weltweit: 2010	E K	-73 +55	-82 +53	-91 +51	- 99 + 44	-100 + 5	-100 - 33
EK-Bonn	a) Montrealer Protokoll <sup>2)</sup> <i>ohne</i> Ausnahmeregelungen Ausstieg weltweit: 2000	E K	-87 +49	-99 +43	-99 +37	- 99 + 30	-100 - 5	-100 - 40
	b) Montrealer Protokoll <sup>2)</sup> <i>ohne</i> Ausnahmeregelungen Ausstieg: Bundesrepublik Deutschland: 1995; EG: 1997; Welt: 2000	E K	-91 +45	-99 +38	-99 +32	-100 + 26	-100 - 8	-100 - 42
EK-Brasilia	wie Bonn Ausstieg weltweit: 1997	E K	-95 +43	-99 +37	-99 +31	-100 + 25	-100 - 9	-100 - 42
		H- FCKW 22						
EK-London	Nach IPCC-Szenario Cr	E K	+ 6,6× + 4,4×	+ 8,4× + 7,0×	+ 10,5× + 9,9×	+ 12,3× + 13,1×	+ 30,8× + 42,8×	+ 33,1× + 66,0×
EK- Washington	Ausstieg weltweit: 2040	E K	+14,7× + 6,0×	+ 16,9× + 12,2×	+ 25,0× + 18,6×	+ 20,8× + 24,8×	-100 + 11,1×	-100 - 15
EK-Bonn	Ausstieg weltweit: 2005	E	+17,4×	-100	-100	-100	-100	-100
		K	+ 8,4×	+ 9,6×	+ 7,4×	+ 5,7×	- 27	- 93

1) Szenarien der Enquete-Kommission

2) Montrealer Protokoll in der Fassung der 2. Vertragsstaatenkonferenz von London

verschärft, daß weltweit keine Ausnahmeregelungen mehr zugelassen werden (EK-Szenario Bonn a) und daß nach gestaffelten Plänen für die Bundesrepublik Deutschland 1995, die Europäische Gemeinschaft 1997 und die Welt im Jahre 2000 (EK-Szenario Bonn b)

aus der FCKW-Verwendung und -Produktion ausgestiegen wird. Welche Erfolge damit bei der Verringerung der Emissionen und der Konzentrationen in den einzelnen Zeitperioden zu erreichen sind, ist in Tabelle 5 deutlich zu erkennen. So verringert sich zum

Beispiel im Jahre 2100 im Vergleich zu 1985 die FCKW 11-Konzentration im EK-Szenario London mit Ausnahmeregelungen um 48 Prozent, im EK-Szenario Bonn a ohne Ausnahmeregelungen um 54 Prozent und im EK-Szenario Bonn b mit gestaffeltem Ausstieg um 57 Prozent.

Der Ausstiegstermin für H-FCKW 22 wird von 2040 im EK-Szenario Washington auf 2005 im EK-Szenario Bonn vorverlegt. Die Wirkung ist dramatisch. So verringert sich die Konzentration von H-FCKW 22 im Jahre 2100 im Vergleich zu 1985 um 93 Prozent im EK-Szenario Bonn (vgl. Tab. 5). Im EK-Szenario Washington verringert sie sich nur um 15 Prozent.

### 3.1.4 EK-Szenario Brasilia

Mit diesem Szenario soll ein noch schnellerer FCKW-Ausstieg, nämlich weltweit bis zum Jahre 1997, geteet und vorgelegt werden. In den einzelnen Zeitabschnitten bis zum Jahre 2100 verringert sich die Konzentration sowohl von FCKW 11 als auch von FCKW 12 im Schnitt nur noch um etwa 1 Prozent gegenüber dem EK-Szenario Bonn (vgl. Tab. 5).

### 3.1.5 Bewertung der Maßnahmen

Bei der Bewertung der Maßnahmen zur Reduktion der FCKW-Emissionen steht zwar die Zerstörung der Ozonschicht in der Stratosphäre durch FCKW und H-FCKW im Vordergrund (vgl. Abschnitt D). Die voll- und teilhalogenierten Kohlenwasserstoffe müssen aber auch wegen ihres hohen Erwärmungspotentials zur Bewertung herangezogen werden. Das Erwärmungspotential einer Substanz hängt ab von der Intensität der absorbierten Strahlungsenergie, die mit steigender Konzentration der FCKW zunimmt. Letztere ist abhängig von den in die Atmosphäre emittierten Mengen und deren Verweilzeit.

Die Maßnahmen zur Reduktion der Emissionen von FCKW in die Atmosphäre führen zu folgenden Auswirkungen auf ihre Konzentration und den Anteil des zusätzlichen Treibhauseffektes im Jahre 2100 gegenüber 1985, der auf die FCKW zurückzuführen ist (vgl. Tab. 6):

- Das Montrealer Protokoll in der Fassung der 2. Vertragsstaatenkonferenz von London, das bei Ausschöpfung der Ausnahmeregelungen zu einem

Tabelle 6

#### Mittlere globale Erwärmung durch die zunehmenden Konzentrationen von FCKW und H-FCKW 22 für verschiedene Szenarien (58)

Die Wirksamkeit von Maßnahmen zur Reduzierung der FCKW- und H-FCKW 22-Konzentrationen sowie zur Eindämmung des zusätzlichen Treibhauseffektes

Maßnahmen	Mittlere globale Änderungen im Jahre 2100 bezogen auf 1985			
	Konzentration		Treibhauseffekt <sup>1)</sup>	
	FCKW <sup>2)</sup>	H-FCKW 22	FCKW <sup>2)</sup>	H-FCKW 22
<b>EK-Szenario London</b>				
FCKW nach Montrealer Protokoll <sup>3)</sup> mit Ausnahmeregelungen; Ausstieg: 2010 .....	–53		–39	
H-FCKW 22 nach IPCC Szenario Cr .....		6 600		6 500
<b>EK-Szenario Washington</b>				
FCKW wie Szenario London				
H-FCKW 22; Ausstieg: 2040 .....		–15		–17
<b>EK-Szenario Bonn</b>				
a) FCKW nach Montrealer Protokoll <sup>3)</sup> ohne Ausnahmeregelungen; Ausstieg weltweit: 2000 .....	58		–45	
H-FCKW 22; Ausstieg: 2005 .....		–93		–100
b) FCKW nach Montrealer Protokoll <sup>3)</sup> ohne Ausnahmeregelungen; Ausstieg für BRD: 1995; EG: 1997; weltweit: 2000				
H-FCKW 22; Ausstieg: 2005 .....	–59		–47	
<b>EK-Szenario Brasilia</b>				
FCKW nach Szenario Bonn mit beschleunigtem Ausstieg weltweit: 1997 .....	–60		–48	

1) Abgeleitet vom Strahlungsantrieb, bezieht sich nur auf den durch FCKW bzw. H-FCKW 22 zurückzuführenden Anteil des Treibhauseffektes

2) Schließt ein die FCKW 11, 12, 113, 114 und 115 sowie H 1301, CCl<sub>4</sub> und CH<sub>3</sub>CCl<sub>3</sub>

3) in der Fassung der 2. Vertragsstaatenkonferenz von London



Ausstieg bis zum Jahre 2010 führt, bewirkt eine Verminderung der FCKW-Konzentration um 53 Prozent und eine Eindämmung des Anteils des zusätzlichen Treibhauseffekts, der auf die FCKW zurückzuführen ist, um 39 Prozent (vgl. EK-Szenario London).

- Die Abschaffung oder Nicht-Inanspruchnahme der Ausnahmeregelungen im Montrealer Protokoll in der Fassung der 2. Vertragsstaatenkonferenz von London führt zu einem FCKW-Ausstieg weltweit schon bis zum Jahre 2000. Dadurch wird die FCKW-Konzentration um weitere fünf Prozent und der Anteil des zusätzlichen Treibhauseffekts, der auf die FCKW zurückzuführen ist, um weitere sechs Prozent reduziert (vgl. EK-Szenario Bonn a).
- Steigt die BRD bereits 1995 aus der FCKW-Verwendung aus, die EG bis 1997 und die Welt bis 2000, so wird die FCKW-Konzentration um ein weiteres Prozent und der Anteil des zusätzlichen Treibhauseffekts, der auf die FCKW zurückzuführen ist, um weitere zwei Prozent reduziert (vgl. EK-Szenario Bonn b).
- Ein beschleunigter weltweiter Ausstieg bis 1997 verringert den FCKW-Gehalt in der Atmosphäre und den Anteil des zusätzlichen Treibhauseffekts, der auf die FCKW zurückzuführen ist, um jeweils einen weiteren Prozentpunkt (vgl. EK-Szenario Brasilia).

Für H-FCKW 22 ergeben sich im Jahre 2100 folgende Reduktionen bezogen auf 1985 (vgl. Tab. 6):

- Nach der gegenwärtigen Fassung des Montrealer Protokolls, das für Ersatzstoffe keine Kontrollmaßnahmen vorsieht, unter Zugrundelegung der Londoner Beschlüsse, könnten sowohl die Konzentrationen als auch der durch H-FCKW 22 verursachte Anteil des zusätzlichen Treibhauseffektes um mehr als das sechzigfache zunehmen (vgl. EK-Szenario London).
- Ein Ausstieg bis zum Jahre 2040 könnte dagegen zu einer Verminderung der Konzentration in der Atmosphäre und einer Eindämmung des auf H-FCKW 22 zurückzuführenden Anteils des zusätzlichen Treibhauseffekts um jeweils etwa 15 Prozent führen (vgl. EK-Szenario Washington).
- Eine Vorverlegung des Ausstiegstermins auf das Jahr 2005 würde bedeuten, daß bei einer Reduktion um 90 bis 100 Prozent bis zum Jahre 2100 fast keine Auswirkungen mehr auf Konzentration und Erwärmung zu verzeichnen wären (vgl. EK-Szenario Bonn).

Aus diesen Untersuchungsergebnissen und aus den Erkenntnissen über den Ozonabbau (vgl. Abschnitt D) zieht die Kommission den Schluß, daß aus Gründen der Vorsorge Vereinbarungen nach dem Bonner Szenario notwendig sind. Das bedeutet einen FCKW-Ausstieg für die Bundesrepublik Deutschland bis 1995, für die Europäische Gemeinschaft bis 1997 und für die ganze Welt bis 2000 sowie ein H-FCKW 22-Ausstieg bis zum Jahre 2005. Die Kommission hält es darüber hinaus für geboten, einen beschleunigten FCKW-Ausstieg weltweit schon bis zum Jahre 1997 anzustreben.

### 3.2 Die Wirksamkeit der EK-Empfehlungen zur Reduktion der Kohlendioxid-Emissionen

Zur Abschätzung der Auswirkungen der Reduktion der CO<sub>2</sub>-Emissionen und zur Bewertung der erforderlichen Maßnahmen hat die Kommission drei weitere Szenarien entwickelt (für eine detaillierte Beschreibung vgl. Nr. 1.2).

Hauptzweck dieser Untersuchungen ist es, die Wirksamkeit des von der Kommission entwickelten Tropenwald-Rettungsplans und der empfohlenen Reduktionsziele energiebedingter CO<sub>2</sub>-Emissionen bei der Eindämmung des zusätzlichen Treibhauseffekts abzuschätzen und zu bewerten.

#### 3.2.1 EK-Szenario A: Status-quo

Der energiebedingte CO<sub>2</sub>-Ausstoß folgt den Angaben des IPCC-Szenario BAU (business-as-usual) mit einer Zunahme von etwas mehr als 300 Prozent zwischen 1985 und 2100. Die CO<sub>2</sub>-Emission aus der Tropenwaldvernichtung reduziert sich nach dem EK-Szenario London um etwa 40 Prozent von 1990 bis zum Jahre 2100. Insgesamt nehmen die CO<sub>2</sub>-Emissionen dadurch um 223 Prozent von 1985 bis 2100 zu (vgl. Tab. 7). Durch die steigenden CO<sub>2</sub>-Emissionen nimmt die Konzentration in der Atmosphäre von 345 ppmv 1985 um 130 Prozent auf etwa 794 ppmv im Jahre 2100 zu. Gleichzeitig steigt die mittlere globale Temperatur allein durch die zunehmenden Emissionen von CO<sub>2</sub> je nach Klimasensitivität um 1,5 bis 3,1°C von 1860 bis 2100 (vgl. Tab. 8).

#### 3.2.2 EK-Szenario C: Tropenwald-Rettungsplan

Um die Wirksamkeit des Tropenwald-Rettungsplans der Kommission (60) zu untersuchen, bleiben der energiebedingte CO<sub>2</sub>-Ausstoß und die Emissionen der anderen Treibhausgase unverändert wie in EK-Szenario A. Nach dem Dreistufenplan der Kommission soll in der ersten Stufe von 1990 bis 2000 die Rate der Tropenwaldvernichtung reduziert, in der zweiten Stufe bis zum Jahre 2010 die Tropenwaldvernichtung gestoppt und in der dritten Stufe bis zum Jahre 2030 der Umfang der Tropenwaldbestände von 1990 wieder hergestellt werden.

Tabelle 7 zeigt deutlich die Wirkung dieser Maßnahmen. Nach dem Tropenwald-Rettungsszenario (EK-C) ist der Anstieg der CO<sub>2</sub>-Emissionen von 1985 bis 2100 um etwa 20 Prozent und der Anstieg der CO<sub>2</sub>-Konzentration um etwa 10 Prozent geringer als nach dem Tropenwald-Vernichtungsszenario (EK-A). Die mittlere globale Erwärmung zwischen 1860 und 2100, die auf die zunehmenden Emissionen von CO<sub>2</sub> zurückzuführen ist, beträgt nach EK-Szenario C nur 1,4 bis 2,9°C und ist damit um etwa zwei Zehntel Grad geringer als in EK-Szenario A (vgl. Tab. 8).

Wichtiger ist, daß das Tropenwald-Rettungsszenario besonders in der kritischen Übergangsphase hin zu einer Wirtschaftsweise mit geringeren CO<sub>2</sub>-Emissionen zwischen 2005 und 2030 (vgl. EK-Szenario C,

Tabelle 7

**Die Auswirkungen von Maßnahmen und Sensitivitäts-Tests auf die globalen CO<sub>2</sub>-Emissions- und Konzentrationsänderungen (59)**

Szenario <sup>1)</sup>	Maßnahmen/ Sensitivitäts-Tests	Emission (E) Konzentration (K)	Globale Änderung in Prozent						
			1985 bis 2000	1985 bis 2010	1985 bis 2025	1985 bis 2030	1985 bis 2050	1985 bis 2075	1985 bis 2100
EK-A	CO <sub>2</sub> gemäß fossilem Brennstoffverbrauch des IPCC-Szenarios BAU (business-as-usual) CO <sub>2</sub> gemäß Tropenwald-Vernichtungs-Szenario im EK-Szenario London	E	+24	+38	+69	+78	+116	+172	+223
		K	+ 8	+14	+25	+30	+ 51	+ 85	+130
EK-C	CO <sub>2</sub> energiebedingt gemäß EK-A CO <sub>2</sub> gemäß Tropenwald-Rettungsplan des 2. EK-Berichts	E	+24	+ 7	+37	+46	+ 83	+148	+202
		K	+ 8	+14	+23	+27	+ 46	+ 78	+120
EK-D	CO <sub>2</sub> energiebedingt gemäß den EK-Empfehlungen für Ländergruppen CO <sub>2</sub> gemäß Tropenwald-Rettungsplan	E	+ 8	- 1	-45	-50	- 68	- 62	- 62
		K	+10	+14	+17	+18	+ 20	+ 22	+ 25
EK-Sensitivitäts-Test S5		E	-15	-19	-25	-26	- 30	- 40	- 40
		K	+ 6	+ 9	+12	+13	+ 17	+ 22	+ 25
EK-Sensitivitäts-Test S4		E	-30	-44	-60	-65	- 80	- 80	- 80
		K	+ 6	+ 7	+ 7	+ 8	+ 8	+ 8	+ 8

1) Szenarien der Enquete-Kommission

Tabelle 8

**Die Abhängigkeit der mittleren globalen Erwärmung von unterschiedlichen Emissionszielen (61)**

CO <sub>2</sub>	Globale Emissionsänderung in Prozent					Erwärmung zwischen 1860 und 2100 in °C		
	1985– 2000	1985– 2005	1985– 2020	1985– 2050	1985– 2100	Klimasensitivitäten		
						1,5 °C	2,5 °C	4,5 °C
<b>IPCC-Szenarien</b>								
BAU .....	28	40	76	155	270	1,41	2,05	2,91
Br .....	- 6	- 5	3	27	74	0,92	1,35	1,95
Cr .....	- 6	- 4	3	20	-41	0,78	1,16	1,70
Dr .....	- 7	- 8	-12	-51	-55	0,62	0,93	1,39
Er .....	-23	-26	-34	-38	-57	0,60	0,89	1,32
<b>EK-Szenarien</b>								
A .....	24	31	56	116	223	1,51	2,19	3,11
C .....	24	16	26	83	202	1,44	2,09	2,96
D .....	8	-11	-39	-68	-68	0,62	0,93	1,37
<b>EK-Sensitivitäts-Tests</b>								
S1 .....	0	- 2	- 8	-20	-20	0,76	1,13	1,67
S2 .....	-15	-17	-23	-30	-40	0,66	0,98	1,46
S3 .....	5	4	-23	-57	-57	0,59	0,88	1,29
S4 .....	-30	-38	-56	-80	-80	0,43	0,65	0,97

Nr. 1.2.3) der Atmosphäre beträchtliche Mengen an CO<sub>2</sub> entzieht. Dies wird durch die Darstellung der Differenzen von Jahr zu Jahr zwischen dem EK-Szenario A (Tropenwald-Vernichtung) und EK-Szenario C (Tropenwald-Rettungsplan) besonders deutlich.

Abbildung 17 a zeigt, daß das Tropenwald-Rettungs-szenario in der ersten Hälfte des 21. Jahrhunderts gegenüber dem Tropenwald-Vernichtungsszenario zu einer Verringerung der anthropogenen CO<sub>2</sub>-Emissionen in einzelnen Jahren von bis zu 2,5 Milliarden Ton-

nen Kohlenstoff oder etwa 20 Prozent führt. Die CO<sub>2</sub>-Konzentration reduziert sich gegenüber dem Tropenwald-Vernichtungsszenario wegen der Trägheit des Kohlenstoffkreislaufs stetiger (vgl. Abb. 17 b). Bis zum Jahre 2100 führt die zunehmende Bindung von CO<sub>2</sub> aus der Atmosphäre dazu, daß die CO<sub>2</sub>-Konzentration gegenüber dem Tropenwald-Vernichtungsszenario um etwa 30 ppmv oder 4 Prozent reduziert wird. Als Folge der Reduktion der CO<sub>2</sub>-Konzentration steigt auch die mittlere globale Temperatur um 0,07 bis 0,14°C weniger (vgl. Abb. 17 c).

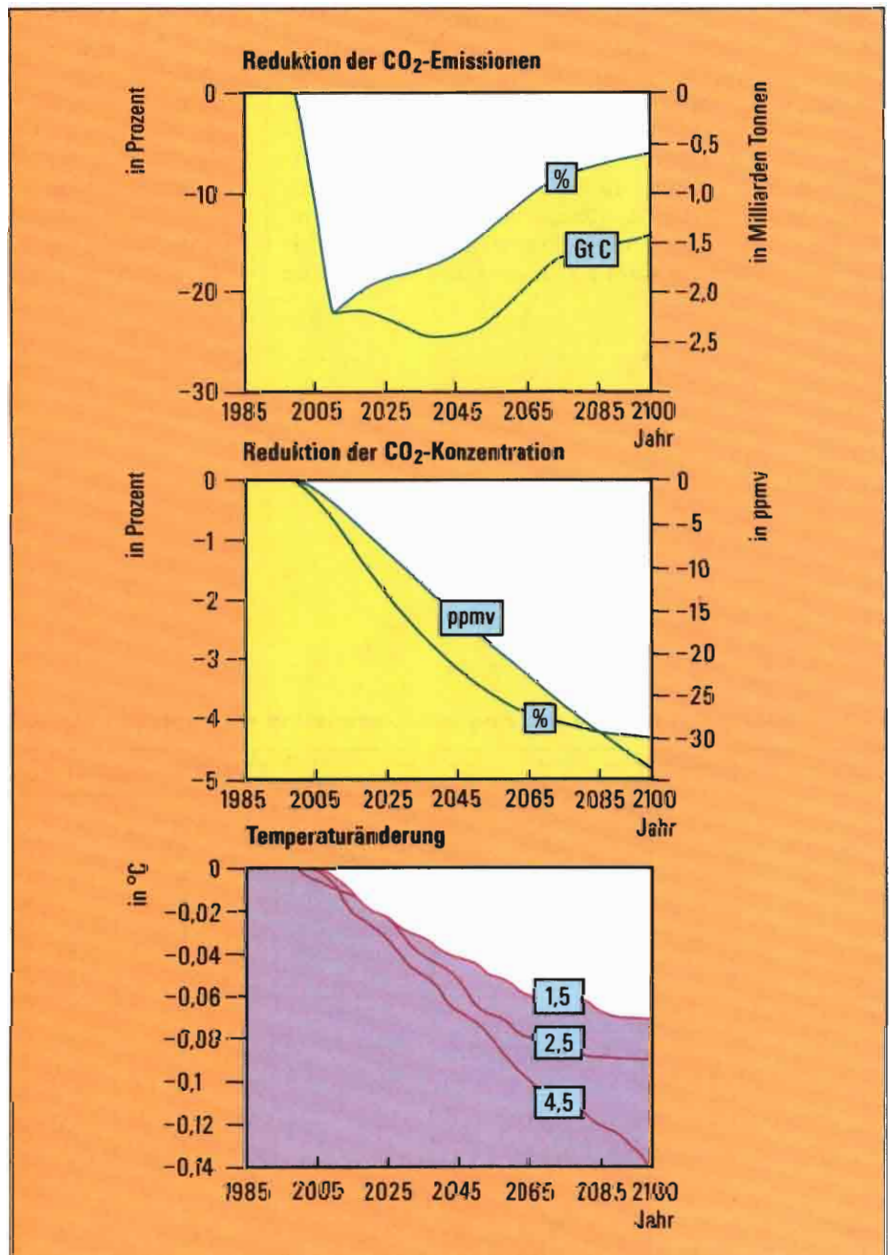


Abb. 17: Die Wirksamkeit des von der Enquete-Kommission empfohlenen Tropenwald-Rettungsplans (Szenario C) zur Reduktion. a. der CO<sub>2</sub>-Emissionen; b. der CO<sub>2</sub>-Konzentrationen und c. der mittleren globalen Oberflächentemperatur für die Modellsensitivitäten 1,5, 2,5 und 4,5 °C (62). Die Abbildung stellt die Differenzen zwischen EK-Szenario A und EK-Szenario C dar.

### 3.2.3 EK-Szenario D: Reduktionsplan für fossile Brennstoffe

Dieses Szenario geht von der Erkenntnis aus, daß nicht nur wegen den unterschiedlichen wirtschaftlichen und technischen Entwicklungen in Industrie- und Entwicklungsländern, sondern auch aus Gründen der Gleichbehandlung und eines daraus abgeleiteten Nachholbedarfs vieler Dritte-Welt-Länder, eine nach Ländergruppen differenzierte Zuordnung der erforderlichen CO<sub>2</sub>-Emissions-Reduktionsquoten eine größere Aussicht auf Akzeptanz hat als eine gleichartige Aufteilung der Reduktionslasten.

Es wird weiter davon ausgegangen, daß der von der Kommission für die Bundesrepublik Deutschland erstellte Reduktionsplan für energiebedingte CO<sub>2</sub>-Emissionen – nämlich Reduktionen um 30 Prozent bis 2005, um 50 Prozent bis 2020 und um 80 Prozent bis 2050 – auf die wirtschaftsstarken westlichen Industrieländer mit sehr hohen Pro-Kopf-Emissionen übertragen werden kann. Die Länder Osteuropas einschließlich der UdSSR folgen mit einem etwas langsameren Reduktionsplan, reduzieren allerdings auch bis zum Jahre 2050 die CO<sub>2</sub>-Emissionen um 80 Prozent. Die Emissionen der Entwicklungsländer nehmen bis zum Jahre 2005 um etwa 50 Prozent und bis 2050 um

etwa 70 Prozent zu und überflügeln die der Industrieländer in der ersten Hälfte des nächsten Jahrhunderts. Für die Entwicklungsländer ist es besonders wichtig, ebenfalls wie die Industrieländer möglichst bald den Übergang in eine effizientere Energiewirtschaft mit geringeren CO<sub>2</sub>-Emissionen zu schaffen.

Den Erfolg dieser Maßnahmen spiegelt EK-Szenario D in den stark abnehmenden CO<sub>2</sub>-Emissionen und den abgeschwächten Anstiegen der CO<sub>2</sub>-Konzentration wider. Auch hier ist eine Detailuntersuchung, welche die Differenzen von Jahr zu Jahr zwischen dem EK-Szenario C (energiebedingter CO<sub>2</sub>-Ausstoß nach IPCC-Szenario BAU) und dem EK-Szenario D (nach Ländergruppen differenzierter Reduktionsplan der Kommission) darstellt, aufschlußreich. Abbildung 18 a zeigt, daß es zunächst einige Zeit dauert, bis die Maßnahmen zur Reduktion der CO<sub>2</sub>-Emissionen greifen, daß sich diese aber danach bei einem zügigen Rückgang gegenüber EK-Szenario C bis zum Jahre 2100 um fast 20 Milliarden Tonnen Kohlenstoff oder etwa 90 Prozent verringern. Dieser Rückgang der Emissionen äußert sich bis zum Jahre 2100 in einer Verminderung der CO<sub>2</sub>-Konzentration um etwa 350 ppmv oder etwa 45 Prozent (vgl. Abb. 18 b) und einer Verminderung der Erwärmung um 0,9 bis 1,7°C (vgl. Abb. 18 c und Tab. 9).

Tabelle 9

#### Die Wirksamkeit der von der Enquete-Kommission empfohlenen Maßnahmen zur CO<sub>2</sub>-Reduktion (63)

Szenario	Maßnahmen	Mittlere globale Änderungen in 2100									
		CO <sub>2</sub> -Emission <sup>2)</sup>		CO <sub>2</sub> -Konzentration <sup>2)</sup>		Temperatur <sup>3)</sup> für Klimasensitivitäten					
		in Milliarden Tonnen Kohlenstoff	in %	in ppmv	in %	1,5 °C		2,5 °C		4,5 °C	
						in °C	in %	in °C	in %	in °C	in %
EK B—C <sup>1)</sup>	Tropenwald-Rettungsplan nach dem 2. EK-Bericht	- 1,5	- 6	- 34	- 4	-0,07	- 3	-0,09	- 3	-0,14	- 3
EK C—D	Reduktionsplan für fossile Brennstoffe	-19,2	-87	-338	-44	-0,87	-44	-1,23	-43	-1,65	-41

<sup>1)</sup> Wirksamkeit von EK-Szenario C gegenüber EK-Szenario B

<sup>2)</sup> Bezogen auf 1985

<sup>3)</sup> Bezogen auf 1860

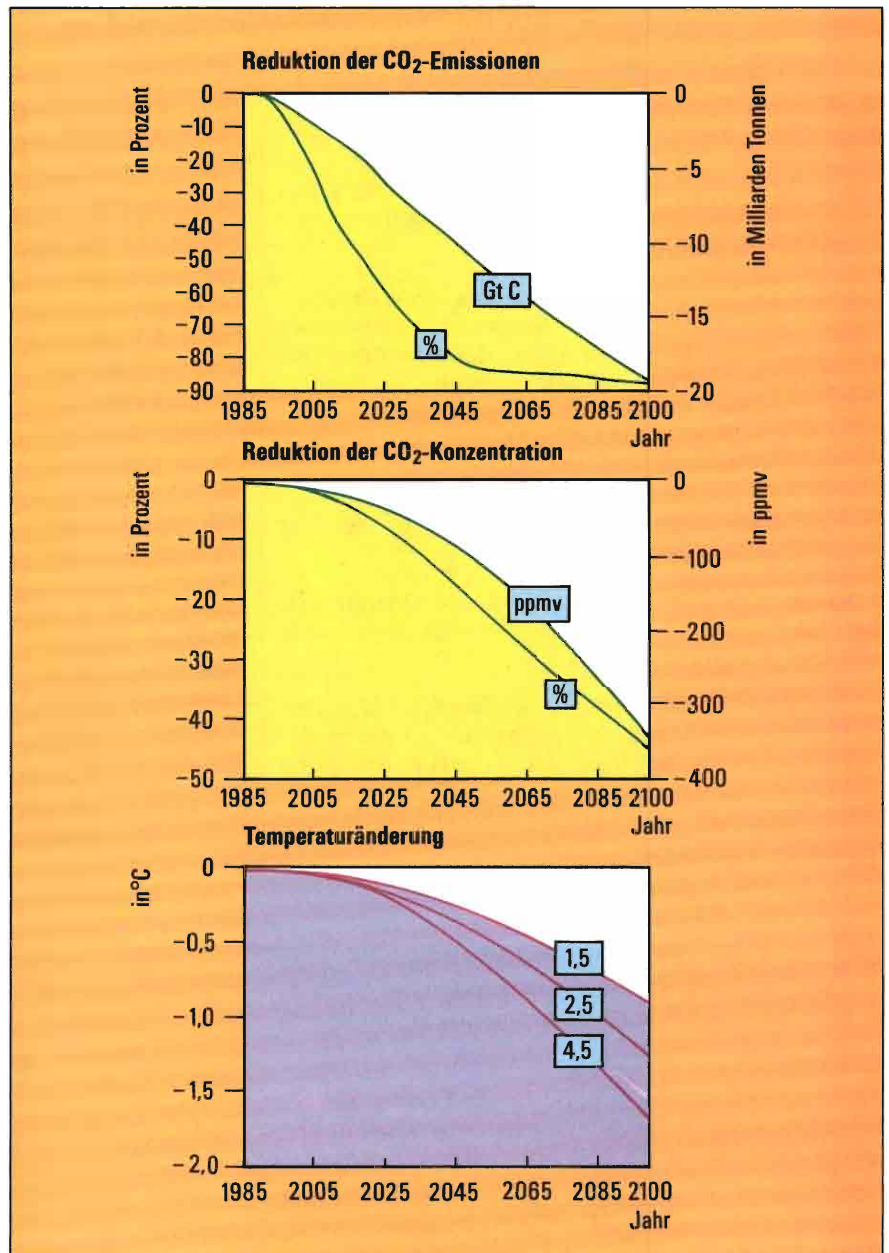


Abb. 18: Die Wirksamkeit der von der Enquete-Kommission empfohlenen energiebedingten Emissionsziele (Szenario D) zur Reduktion a. der CO<sub>2</sub>-Emission; b. der CO<sub>2</sub>-Konzentration und c. der mittleren globalen Oberflächentemperatur für die Modellsensitivitäten 1,5, 2,5 und 4,5 °C (63). Die Abbildung stellt die Differenzen zwischen EK- Szenario D und EK-Szenario E dar.

### 3.2.4 Bewertung der Maßnahmen

Um der Bewertung eine etwas breitere Grundlage zu geben, hat die Kommission einige zusätzliche Sensitivitäts-Tests sowie die Berechnungen auch für die IPCC-Szenarien durchgeführt. Sensitivitäts-Test S5 in Tabelle 7 zeigt, daß die CO<sub>2</sub>-Konzentration im Jahre 2100 auch dann noch etwas höher als in EK-Szenario D ist, wenn die CO<sub>2</sub>-Emissionen in den Anfangsjahren zunächst stärker, aber etwa nach der Mitte des nächsten Jahrhunderts etwas geringer reduziert werden. Eine Stabilisierung der CO<sub>2</sub>-Konzentration auf Werte um 370 ppmv (etwa 8 Prozent über dem Niveau von

1985) kann beispielsweise erreicht werden, wenn die CO<sub>2</sub>-Emissionen anfangs mit 30 Prozent bis zum Jahre 2000 doppelt so stark und bis zum Jahre 2050 um 80 Prozent, bezogen auf 1985, reduziert werden (vgl. Tab. 7).

Bei der Betrachtung der Szenarien- und Sensitivitäts-Analysen in Tabelle 8 ist zu beachten, daß sich die berechnete Erwärmung nur auf Änderungen der CO<sub>2</sub>-Emissionen bezieht. Bei Einbeziehung aller bekannter Treibhausgase erreicht die globale Erwärmung in dem betrachteten Zeitraum von 1860 bis 2100 Werte, die um 30 bis 40 Prozent höher liegen. In den IPCC-Szenarien wird durch systematische Reduktion der

Emissionen zwischen dem höchsten Szenario BAU und dem niedrigsten Szenario Er die Erwärmung um etwa 55 Prozent verringert. Die EK-Szenarien und EK-Sensitivitätstests zeigen weitere Möglichkeiten der zeitlichen Änderung der Emission. Gegenwärtig werden zwischen dem höchsten und dem niedrigsten der betrachteten Szenarien durch Reduktion der CO<sub>2</sub>-Emission Minderungen der globalen Erwärmung zwischen 40 und 50 Prozent erreicht.

Die Wirksamkeit der von der Kommission speziell für die CO<sub>2</sub>-Reduktion vorgeschlagenen Maßnahmen läßt sich für den biogenen Anteil, der durch die Vernichtung der tropischen Wälder entsteht, aus der Differenz zwischen EK-Szenario B (Tropenwaldvernichtung) und EK-Szenario C (Tropenwaldrettung) sowie für den energiebedingten Anteil aus der Differenz EK-Szenario C (business-as-usual) und EK-Szenario D (Reduktionsplan für fossile Brennstoffe) für das Jahr 2100 wie folgt ableiten:

Durch den Tropenwald-Rettungsplan reduziert sich gegenüber dem Tropenwald-Vernichtungsszenario (vgl. Tab. 9 und Abb. 17)

- der globale CO<sub>2</sub>-Ausstoß um etwa 1,5 Milliarden Tonnen Kohlenstoff oder 6 Prozent ( in der ersten Hälfte des 21. Jahrhunderts können in einzelnen Jahren Verringerungen bis zu 2,5 Milliarden Tonnen Kohlenstoff oder fast 20 Prozent erreicht werden),
- der globale CO<sub>2</sub>-Gehalt der Atmosphäre um etwa 30 ppmv oder 4 Prozent und
- die mittlere globale Erwärmung zwischen 1985 und 2100, je nach Klimasensitivität in der Größenordnung unterschiedlich, im Durchschnitt um etwa 3 Prozent.

Durch den Reduktionsplan für fossile Brennstoffe reduziert sich gegenüber dem business-as-usual in EK-Szenario C (vgl. Tab. 9 und Abb. 18)

- die globale CO<sub>2</sub>-Emission um etwa 20 Milliarden Tonnen Kohlenstoff oder fast 90 Prozent,
- der globale Anstieg der CO<sub>2</sub>-Konzentration der Atmosphäre um etwa 340 ppmv oder fast 45 Prozent,
- die mittlere globale Erwärmung um etwa 40 Prozent zwischen 1985 und 2100.

Die Kommission fühlt sich auch durch diese Teilergebnisse in ihrem Bemühen bestärkt, sich für die Umsetzung des in ihrem 2. Bericht entwickelten Dreistufenplans zur Rettung der Tropenwälder tatkräftig einzusetzen. Ohne Zweifel liegt aber das größte Potential zur Eindämmung des zusätzlichen Treibhauseffekts in der Reduktion der energiebedingten CO<sub>2</sub>-Emissionen. Die Kommission ist der Auffassung, daß die von ihr in Szenario D entwickelte Zielvorstellung einer CO<sub>2</sub>-Reduktion um 30 Prozent bis 2005, 50 Prozent bis 2020 und 80 Prozent bis 2050 für die wirtschaftsstarke westlichen Industrieländer mit sehr hohen Pro-Kopf-Emissionen ein guter Anfang mit Signalwirkung ist. Technische und wirtschaftliche Hilfe bildet den nötigen Anreiz für die schlechter gestellten Länder, ihren CO<sub>2</sub>-Ausstoß ebenfalls einzuschränken.

### 3.3 Die Wirkung von Methan und Distickstoffoxid

Die Datenlage für CH<sub>4</sub> und N<sub>2</sub>O muß als äußerst dürftig bezeichnet werden. Sowohl die anthropogenen als auch die natürlichen Quellen und Senken sind nur sehr ungenau bekannt. Aus diesen und anderen Gründen hat sich die Kommission bisher nur am Rande mit dem möglichen Reduktionspotential befaßt. Beide Substanzen sind wichtige Treibhausgase. Die bestehenden Reduktionspotentiale sollten in der nächsten Legislaturperiode abgeschätzt werden, damit auch für diese Bereiche fundierte Vorschläge erarbeitet werden können. Um einen Eindruck von der Notwendigkeit dieses Vorgehens zu vermitteln, folgt ein kurzer Überblick über die möglichen Wirkungen.

#### 3.3.1 Wirkung auf die Konzentration

Wie Tabelle 10 (obere Hälfte) zeigt, ändert sich aufgrund der relativ kurzen Verweilzeit eines CH<sub>4</sub>-Moleküls in der Atmosphäre von etwa zehn Jahren die Konzentration von CH<sub>4</sub> relativ schnell nach einer Änderung der Emissionen. In der Atmosphäre spielen sich komplizierte photochemische Prozesse ab. So kommt es, daß beispielsweise im Sensitivitäts-Test S2 die Konzentration leicht abnimmt, obwohl die Emission nicht verändert wird. Das liegt an den chemischen Rückkopplungen zwischen CH<sub>4</sub>, CO und den OH-Radikalen in der Atmosphäre, die den Berechnungen zugrunde liegen. In diesem Test wird beispielsweise eine Reduktion der Emission von CO um etwa 40 Prozent von 1985 bis 2100 angenommen.

Ganz anders ist die Situation bei N<sub>2</sub>O, dessen Konzentration bei einer Verweilzeit von etwa 150 Jahren in der Atmosphäre sehr viel langsamer auf eine Änderung der Emission reagiert. Tabelle 10 (untere Hälfte) zeigt, daß bei den unterschiedlichsten Änderungen der Emission die Konzentration weiter bis zum Jahre 2100 und darüberhinaus (hier nicht dargestellt) ansteigt.

#### 3.3.2 Wirkung auf die Erwärmung

Durch die unterschiedlichen Verweilzeiten und die verschiedenartigen Reaktionen in der Atmosphäre erzeugen CH<sub>4</sub> und N<sub>2</sub>O auch bei der Erwärmung ganz unterschiedliche Muster der Änderung. Wie Tabelle 11 (obere Hälfte) zeigt, führt eine Änderung der CH<sub>4</sub>-Emissionen von IPCC-Szenario BAU (fast 100 Prozent Zunahme) bis Sensitivitäts-Test S1 (etwa 20 Prozent Abnahme) zu einer Minderung der globalen Erwärmung um etwa 0,4°C (0,42 auf 0,01°C). Dagegen bringt eine Änderung der N<sub>2</sub>O-Emission von IPCC-Szenario BAU (40 Prozent Zunahme) bis Sensitivitäts-Test S1 (4 Prozent Abnahme gegenüber 1985) nur eine Minderung der globalen Erwärmung um 0,03°C (vgl. Tab. 11, untere Hälfte). Mit Recht ist N<sub>2</sub>O das Treibhausgas des 22. Jahrhunderts genannt worden; denn Maßnahmen, die zu ihrer Reduktion bereits jetzt getroffen werden, werden sich erst nach 2100 voll bemerkbar machen.

Tabelle 10

**Emissionsänderungen und die daraus resultierenden Konzentrationsänderungen für CH<sub>4</sub> und N<sub>2</sub>O (64)**

Szenario/Sensitivitäts-Test	CH <sub>4</sub> Emission (E) Konzentr. (K)	Globale Änderung in Prozent				
		1985 bis 2000	1985 bis 2025	1985 bis 2050	1985 bis 2075	1985 bis 2100
EK-A Status-quo .....	E	+13	+41	+66	+83	+97
	K	+12	+38	+64	+78	+88
EK-Sensitivitäts-Test S2 .....	E	0	0	0	0	0
	K	+2	0	-2	-3	-5
EK-Sensitivitäts-Test S1 .....	E	-10	-15	-20	-25	-30
	K	+1	-5	-13	-22	-32
<b>N<sub>2</sub>O</b>						
EK-A Status-quo .....	E	+14	+31	+38	+39	+40
	K	+7	+20	+32	+43	+52
EK-Sensitivitäts-Test S2 .....	E	0	0	0	0	0
	K	+7	+16	+25	+32	+38
EK-Sensitivitäts-Test S1 .....	E	-5	-10	-10	-10	-10
	K	+7	+16	+24	+31	+37

Tabelle 11

**Die Abhängigkeit der mittleren globalen Erwärmung von unterschiedlichen Emissionszielen (65)**

CH <sub>4</sub>	Globale Emissionsänderung in Prozent						Erwärmung zwischen 1860 und 2100 in °C Klimasensitivitäten (°C)		
	1985 bis 2000	1985 bis 2005	1985 bis 2010	1985 bis 2020	1985 bis 2050	1985 bis 2100	1,5	2,5	4,5
	<b>IPCC-Szenarien</b>								
BAU .....	14	19	23	34	66	97	0,21	0,30	0,42
Br .....	7	10	12	19	34	36	0,12	0,17	0,25
Cr .....	3	5	6	10	15	-6	0,06	0,09	0,14
Dr .....	5	6	7	8	2	-7	0,05	0,07	0,11
<b>EK-Sensitivitäts-Test</b>									
S2 .....	0	keine Änderung					0,07	0,10	0,15
S4 .....	0	-1	-2	-3	-7	-15	0,04	0,07	0,10
S5 .....	-4	-5	-5	-7	-11	-18	0,03	0,04	0,06
S1 .....	-7	-8	-8	-10	-15	-22	0,006	0,009	0,01
<b>N<sub>2</sub>O</b>									
<b>IPCC-Szenarien</b>									
BAU .....	14	16	20	27	38	40	0,12	0,17	0,24
Br .....	5	8	10	10	15	17	0,10	0,17	0,22
Cr .....	3	5	8	5	4	-3	0,10	0,15	0,22
Dr .....	3	4	7	4	1	-2	0,10	0,15	0,22
<b>EK-Sensitivitäts-Test</b>									
S3 .....	4	6	7	10	19	33	0,11	0,16	0,24
S2 .....	0	keine Änderung					0,09	0,14	0,21
S5 .....	0	-1	-1	-2	-2	-4	0,09	0,14	0,21
S1 .....	-2	-3	-3	-4	-4	-4	0,09	0,14	0,21

### 3.4 Globale Eindämmung des zusätzlichen Treibhauseffekts

Wenn ein Schutz vor den Folgen des zusätzlichen Treibhauseffektes gewährleistet sein soll, muß eine Obergrenze für den Anstieg der Temperatur festgelegt werden. Im ersten Bericht der Kommission wird es auf der Grundlage der vorhandenen Erkenntnisse zum Schutze der Ökosysteme für notwendig erachtet, daß eine mittlere globale Rate des Temperaturanstiegs von  $0,1^{\circ}\text{C}$  pro Dekade möglichst nicht überschritten wird. Das bedeutet bis zum Ende des nächsten Jahrhunderts eine Erwärmungsobergrenze von etwa  $2^{\circ}\text{C}$  gegenüber dem vorindustriellen Wert. Ziel der Eindämmung des zusätzlichen Treibhauseffektes muß es deshalb sein, daß die über den gesamten Modell-Unsicherheitsbereich von  $1,5^{\circ}\text{C}$  bis  $4,5^{\circ}\text{C}$  berechnete globale Erwärmung bis zum Jahre 2100 unterhalb der  $2^{\circ}\text{C}$ -Obergrenze bleibt.

Im folgenden wird die Wirksamkeit von Maßnahmen anhand der EK-Szenarien A (Status quo) und D (Verschärfung des Montrealer Protokolls in der Fassung der 2. Vertragsstaatenkonferenz von London, Tropenwald-Rettungsplan und Reduktion energiebedingter

$\text{CO}_2$ -Emissionen) näher beleuchtet (vgl. Abb. 19). In EK-Szenario A wird die  $2^{\circ}\text{C}$ -Obergrenze bei Klimasensitivitäten von  $4,5$ ,  $2,5$  und  $1,5^{\circ}\text{C}$  schon 2031 beziehungsweise 2058 und 2099 überschritten. Dagegen wird im EK-Szenario D bei der hohen Sensitivität von  $4,5^{\circ}\text{C}$  die  $2^{\circ}\text{C}$ -Obergrenze erst etwa 30 Jahre später überschritten. Von den Kurven mit den niedrigen Sensitivitäten wird die Grenze von  $2^{\circ}\text{C}$  bis zum Jahre 2100 noch nicht erreicht. Aus der Steigung der Kurven läßt sich jedoch abschätzen, daß früher oder später die  $2^{\circ}\text{C}$ -Grenze auch von der Kurve mit der Klimasensitivität von  $2,5^{\circ}\text{C}$ , die gegenwärtig als die wahrscheinlichste gilt, überschritten wird.

Die Geschwindigkeit, mit der sich die Temperatur ändert, ist der andere Indikator der Belastung von Ökosystemen. Abbildung 19 zeigt die Raten der Temperaturänderung pro Dekade für das Status-quo-Szenario A und das Maßnahmen-Szenario D der Kommission für die drei Klimasensitivitäten. Von 1860 bis zur Mitte des 20. Jahrhunderts ist nur eine geringe Rate der Erwärmung zwischen  $0,01$  und  $0,07^{\circ}\text{C}$  pro Dekade zu verzeichnen. Die kritische Grenze von  $0,1^{\circ}\text{C}$  pro Dekade wird bei der hohen Klimasensitivität von  $4,5^{\circ}\text{C}$  schon 1970 überschritten, um danach weiter

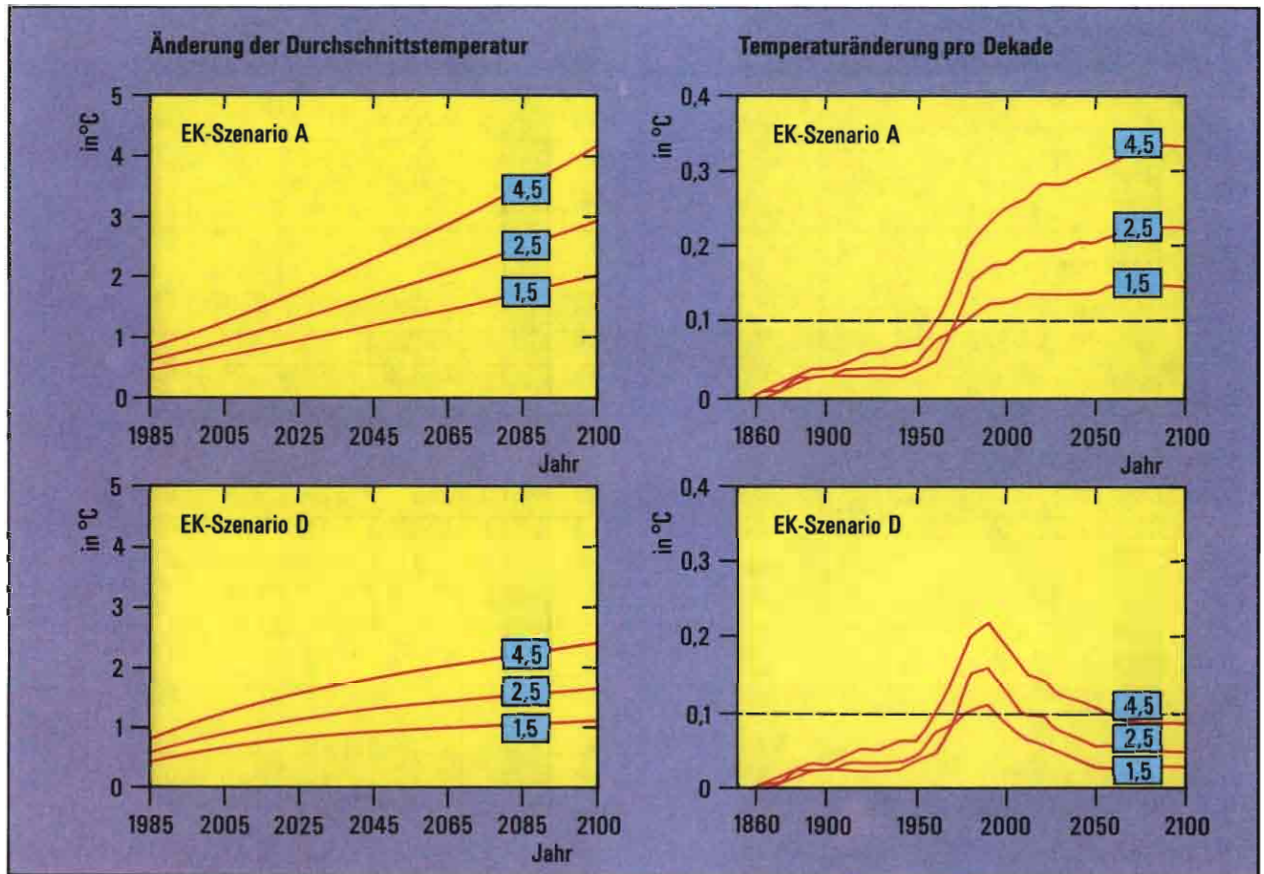


Abb. 19: Temperaturanstieg und Raten der Erwärmung in den EK-Szenarien A und D (66).

Vergleich der unterschiedlichen Größenordnungen und Raten der global gemittelten transienten Temperaturänderungen in den EK-Szenarien A (Status-quo) und D (Verschärfung des Montrealer Protokolls in der Fassung der 2. Vertragsstaatenkonferenz von London plus Tropenwald-Rettungsplan plus Reduktionsziele für fossile Brennstoffe).

Die Berechnungen umfassen den gesamten Modellunsicherheitsbereich von  $1,5$  bis  $4,5^{\circ}\text{C}$ . Die dicke Linie zeigt die für Ökosysteme kritische Änderungsrate von  $0,1^{\circ}\text{C}$  pro Dekade. Die Klimasensitivitäten sind in den Kästchen an den Kurven angegeben.



steil anzusteigen. Im Jahr 2100 übertrifft EK-Szenario A diese Rate um mehr als das Dreifache. Auch bei allen anderen Klimasensitivitäten bleibt EK-Szenario A oberhalb der Sicherheitsmarge. Dagegen erreicht EK-Szenario D bei der hohen Sensitivität im Jahre 2060 wieder die kritische Grenze von 0,1°C pro Dekade und unterschreitet sie im mittleren und niedrigen Sensitivitätsbereich bereits im Jahre 2020 beziehungsweise 2000.

Die Kommission ist bestrebt, weitergehende Maßnahmen zu empfehlen, welche die Rate der Temperaturänderung verlangsamen und damit eine Überschreitung der Erwärmungsgrenze von 2°C verhindern.

### 3.5 Beiträge der einzelnen Treibhausgase zur globalen Erwärmung

Der Strahlungsantrieb (vgl. Nr. 2.1.4) ist ein guter Indikator für die von den Treibhausgasen absorbierte Strahlungsenergie. Unter der Annahme, daß die Änderungen des troposphärischen Strahlungsantriebs durch Treibhausgase additiv sind, kann er zur Ableitung der Beiträge der einzelnen Treibhausgase an der globalen Erwärmung herangezogen werden.

Die Anteile der einzelnen Spurengase am Treibhauseffekt und der starke Anstieg des Strahlungsantriebs spiegeln die Status-quo-Situation in EK-Szenario A wider (vgl. Abb. 20). Der Anteil des CO<sub>2</sub> von etwa 60 Prozent in der Vergangenheit nimmt bis zum Jahre 2000 leicht ab. Das liegt an der relativen Zunahme des Beitrags der FCKW von 9 Prozent im Jahre 1980 auf 12 Prozent im Jahre 2000. EK-Szenario A beruht, was die FCKW betrifft, auf dem Montrealer Protokoll in der Fassung der 2. Vertragsstaatenkonferenz in London mit Ausnahmeregelungen und einem Ausstieg bis 2010. Im Jahre 2025 hat der Effekt des Ausstiegs die FCKW-Anteile von 12 Prozent auf 6 Prozent halbiert. Der Anteil des H-FCKW 22 erreicht im Jahre 2025 mit 4 Prozent seinen größten Wert vor dem Ausstieg, der erst im Jahre 2040 ansteht. Vom Jahre 2025 an nimmt der CO<sub>2</sub>-Anteil relativ zu den anderen Gasen von etwa 60 Prozent auf etwa 74 Prozent zu und erhöht damit noch beträchtlich seine Dominanz.

Im EK-Szenario D bewirken die Maßnahmen zur Reduzierung des fossilen Brennstoffverbrauchs und zur Rettung des Tropenwalds ein Einfrieren des CO<sub>2</sub>-Anteils bis zum Jahre 2100 auf etwa 57 Prozent (vgl. Abb. 21). Das Fehlen von Reduktionsmaßnahmen macht sich besonders deutlich beim CH<sub>4</sub> und beim N<sub>2</sub>O bemerkbar; CH<sub>4</sub> vergrößert seinen Anteil von 14 Prozent

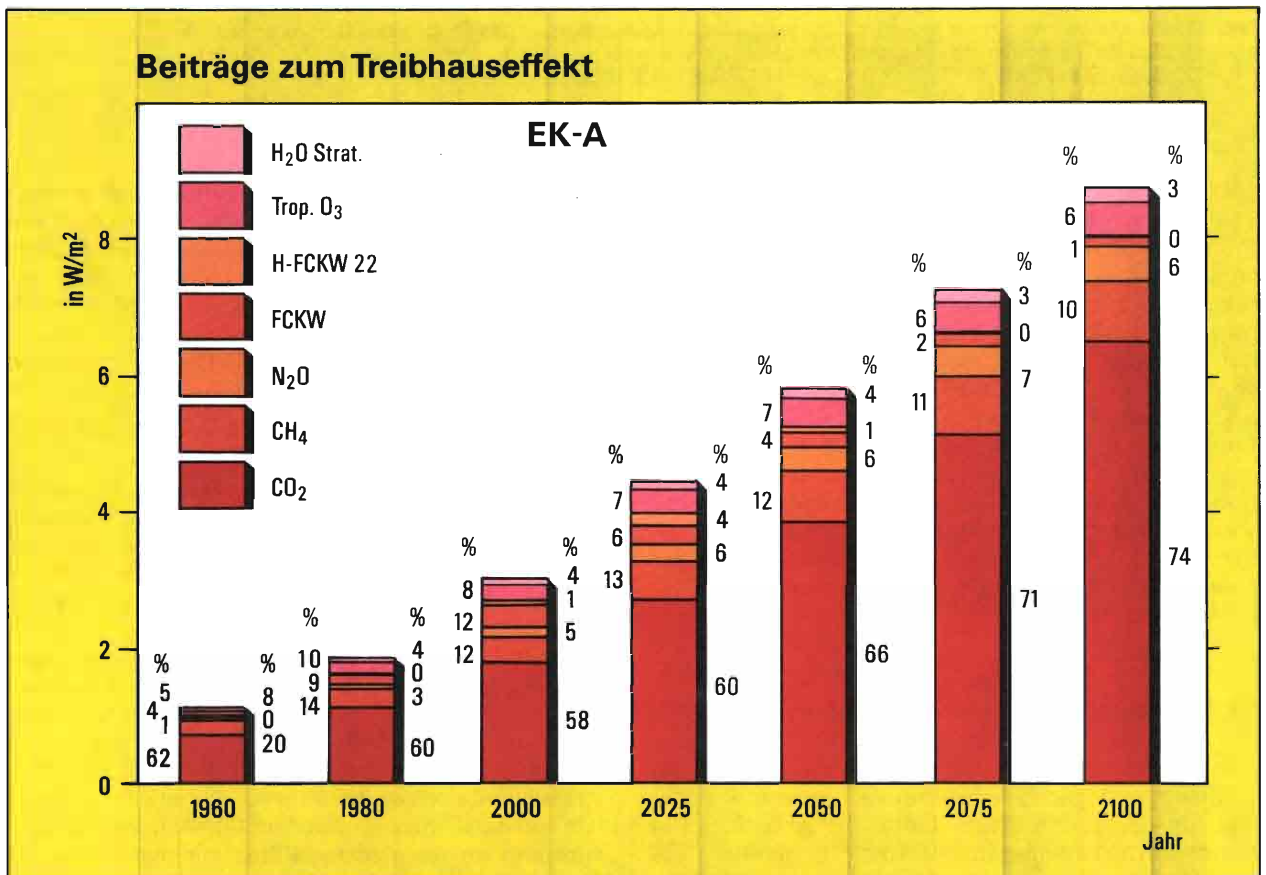


Abb. 20: Die relativen Anteile der einzelnen Spurengase am Treibhauseffekt für das EK-Szenario A bezogen auf 1860 (67). Die FCKW schließen die unter dem Montrealer Protokoll in der Fassung der 2. Vertragsstaatenkonferenz in London kontrollierten Substanzen FCKW 11, 12, 113, 114 und 115 sowie H-1301, CCl<sub>4</sub> und CH<sub>3</sub>CCl<sub>3</sub> mit ein.

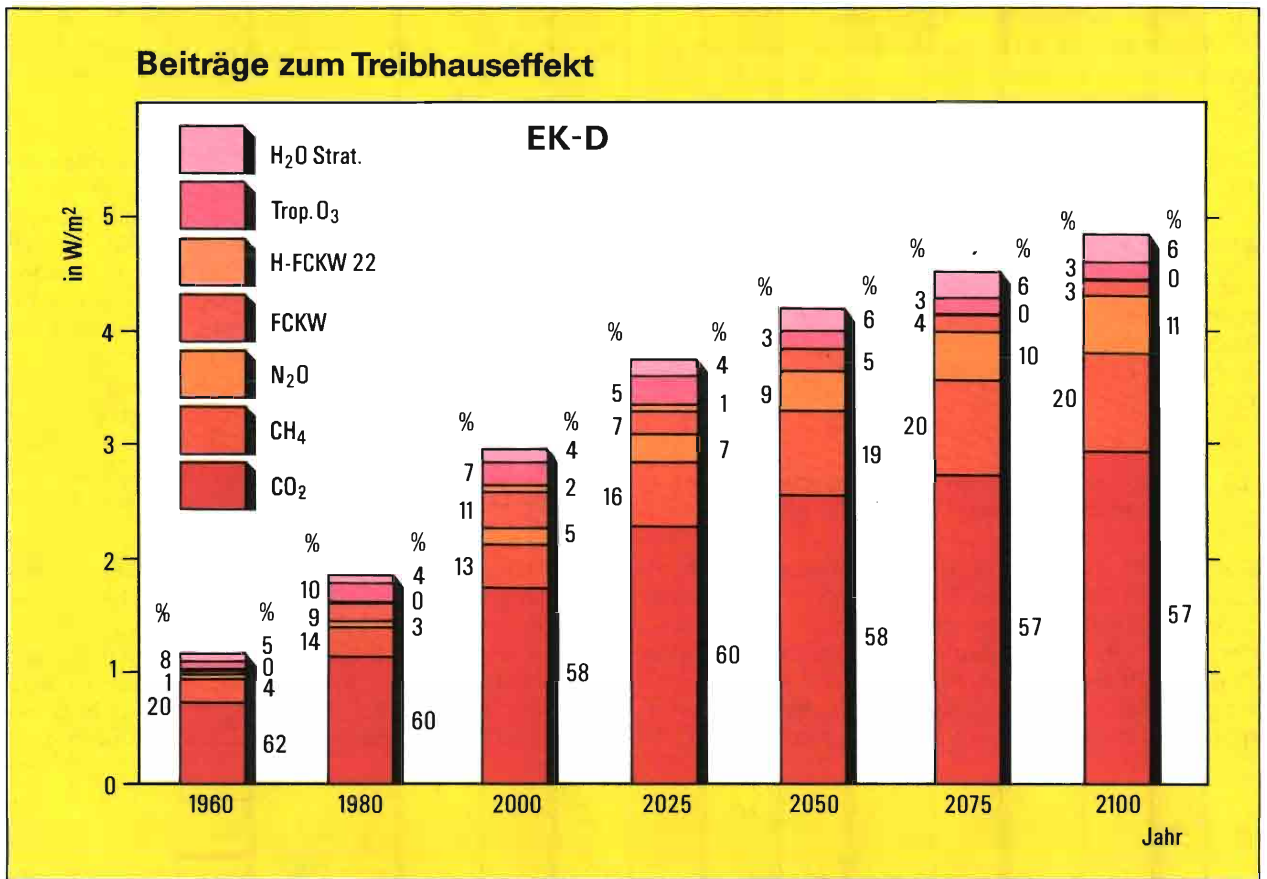


Abb. 21: Die relativen Anteile der einzelnen Spurengase am Treibhauseffekt für das EK-Szenario D bezogen auf 1860 (68). Die FCKW schließen die unter dem Montrealer Protokoll in der Fassung der 2. Vertragsstaatenkonferenz in London kontrollierten Substanzen FCKW 11, 12, 113, 114 und 115 sowie H-1301, CCl<sub>4</sub> und CH<sub>3</sub>CCl<sub>3</sub> mit ein.

1980 auf 20 Prozent im Jahre 2100, während der Anteil von N<sub>2</sub>O im gleichen Zeitraum von 3 Prozent auf 11 Prozent steigt. Die Empfehlungen der Kommission bezüglich der FCKW (Verschärfung des Montrealer Protokolls in der Fassung der 2. Vertragsstaatenkonferenz von London und beschleunigte Ausstiegspläne) äußern sich in einer sukzessiven Abnahme der Anteile von 11 Prozent im Jahr 2000 um mehr als die Hälfte auf 5 Prozent bis 2050. Der empfohlene Ausstieg aus der Produktion und Nutzung von H-FCKW 22 bis zum Jahre 2005 bewirkt, daß dieser Stoff kurz nach 2025 praktisch ohne Einfluß ist. Wichtig ist noch der Hinweis, daß die Empfehlungen der Kommission im EK-Szenario D im Vergleich zum Szenario A (business-as-usual) zu einer merklichen Abflachung der globalen Erwärmung führen.

### 3.6 Vorprogrammierte globale Erwärmung

Die transiente Temperatur spiegelt die zu irgendeinem Zeitpunkt gemessene aktuelle Temperatur wider (vgl. die durchgezogenen Linien in Abb. 22). Die Gleichgewichtstemperatur ist die Temperatur, die sich einstellen würde, wenn das Klimasystem einen sofortigen Ausgleich zuliebe (vgl. die gestrichelten Linien in Abb. 22). Verzögerungseffekte, insbesondere durch den Ozean, verhindern den sofortigen

Ausgleich. Wird nun das Klimasystem durch anthropogene Einflüsse, wie beispielsweise den Anstieg der Treibhausgase, gestört, kommt es zu Temperaturänderungen. Die vertikale Differenz zwischen Gleichgewichts- und transienter Temperatur ist ein Maß für die durch den Menschen in der Vergangenheit angelegte Erwärmung. Die horizontale Differenz zwischen Gleichgewichts- und transienter Temperatur in Abbildung 22 ist ein Maß für die Zeitverzögerung durch den Ozean.

Abbildung 22 zeigt für das EK-Szenario A (Statusquo) und das EK-Szenario D (umfassende Maßnahmen) den Verlauf der Gleichgewichts- und transienten Temperaturänderungen bis zum Jahre 2100 für die Klimasensitivitäten 1,5 und 4,5°C. Danach sind im Jahre 2100 bei der hohen Klimasensitivität von 4,5°C etwa 4,8°C der globalen Erwärmung (Differenz gestrichelte und durchgezogene Linie) wegen der verzögernden Wirkung des Ozeans noch nicht realisiert, dagegen für die niedrige Klimasensitivität nur 0,4°C. Die vom Ozean verursachte Verzögerung des Erwärmungssignals betrug 1985 für die hohe Klimasensitivität von 4,5°C nach dieser Modellrechnung etwa 55 Jahre und für die niedrige Klimasensitivität etwa 30 Jahre. Damit liegen diese Verzögerungszeiten innerhalb des Bereichs von 10 bis 100 Jahren, der aus einer Anzahl unterschiedlicher Atmosphäre-Ozeanmodelle abgeleitet wurde (70).

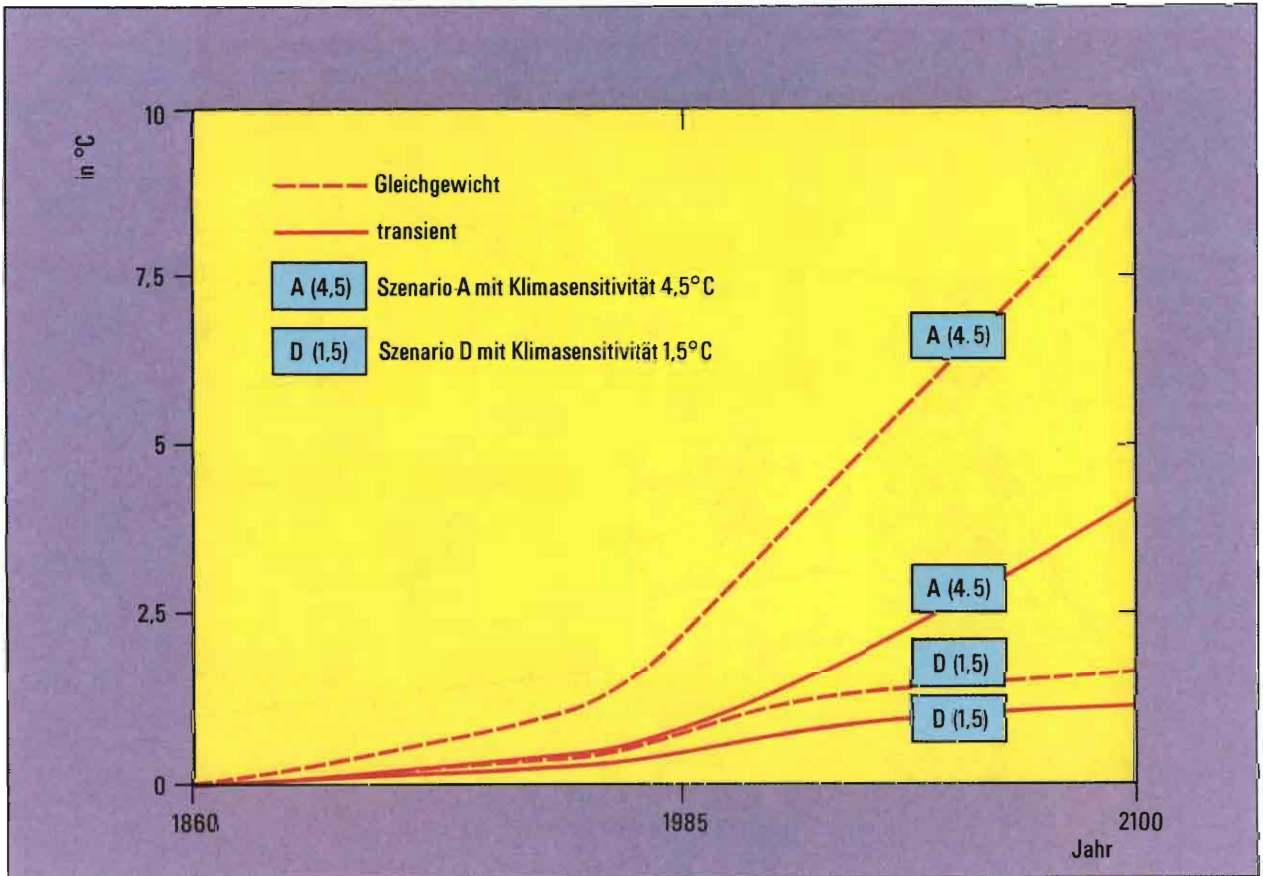


Abb. 22: Die beobachtbare Erwärmung (transient) und die vorprogrammierte Erwärmung (Gleichgewicht) für die Enquete-Szenarien A (Status-quo) und D (Verschärfung des Montrealer Protokolls in der Fassung der 2. Vertragsstaatenkonferenz von London plus Tropenwald-Rettungsplan plus Reduktionsziele für fossile Brennstoffe (69)).

Es ist jedoch darauf hinzuweisen, daß bei global gemittelten Temperaturänderungen um mehr als 5°C gegenüber dem vorindustriellen Wert die Zuverlässigkeit der Modellrechnungen eingeschränkt ist. Die folgenden Aussagen gelten deshalb nur unter Vorbehalt. Abbildung 22 zeigt, daß im EK-Szenario A bei der hohen Klimasensitivität (4,5°C) im Jahre 2100 zu der beobachtbaren transienten Temperaturerhöhung von 4,2°C noch etwa 4,8°C Erwärmung hinzukommt, die aber erst nach 2100 realisiert wird. Es hat sich also bis dahin noch nicht einmal die Hälfte der Erwärmung eingestellt. Bei der niedrigen Sensitivität (1,5°C) und dem niedrigen EK-Szenario D sind bis 2100 bereits etwa 65 Prozent der Temperaturerhöhung, die sich als Folge der zunehmenden Emissionen von Treibhausgasen einstellen wird, realisiert. Die Kommission ist allerdings der Auffassung, daß sie sich in ihrem Entscheidungsprozeß nicht auf die ungewisse Aussicht auf eine niedrige Klimasensitivität verlassen kann, sondern daß sie auf ein niedriges Szenario mit einem geringen Gefahrenpotential für das Klima setzen muß, damit der Nachwelt unter Berücksichtigung der Verzögerung der Erwärmung durch den Ozean eine möglichst geringe Erwärmung aufgebürdet wird.

### 3.7 Langzeit-Erwärmung

Mit der folgenden Sensitivitätsanalyse wird untersucht, wie das Klimasystem auf eine größtmögliche Reduktion der Emission, nämlich auf einen hypothetischen vollständigen Emissionsstopp aller Treibhausgase im Jahre 2100, reagiert. Die Ergebnisse in Abbildung 23 zeigen, daß in der Regel eine flach steigende Temperaturkurve bei niedrigen Klimasensitivitäten mit einer fast unmittelbaren Umkehr reagiert. Dagegen nimmt die mittlere globale Temperatur bei der hohen Klimasensitivität von 4,5°C in EK-Szenario D noch 20 Jahre lang und im EK-Szenario A sogar noch weitere 150 Jahre zu.

Die Erwärmungsobergrenze von 2°C wird in EK-Szenario A bei einer Klimasensitivität von 2,5°C etwa 350 Jahre lang und in EK-Szenario D bei einer Klimasensitivität von 4,5°C etwa 190 Jahre lang überschritten. Wichtiger für die Anpassungsfähigkeit der Ökosysteme ist eine kritische Rate der Temperaturänderungen von etwa 0,1°C pro Dekade. Abbildung 19 hat gezeigt, daß in dem hohen EK-Szenario A die kritische Rate von 0,1°C pro Dekade um mehr als das Dreifache

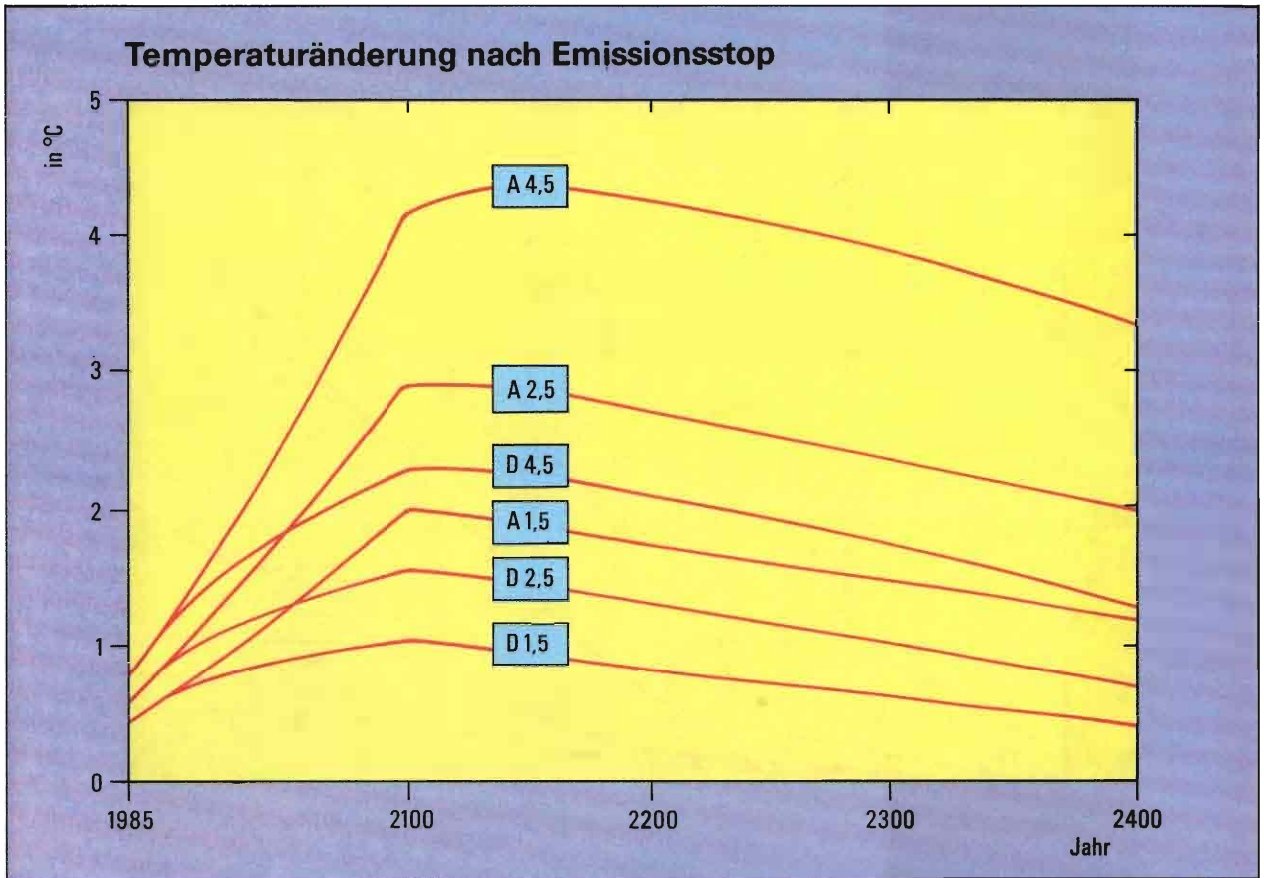


Abb. 23: Langzeit-Erwärmung nach einem vollständigen Emissionsstopp aller Treibhausgase im Jahre 2100 für die EK-Szenarien A (Status-quo) und D (Verschärfung des Montrealer Protokolls in der Fassung der 2. Vertragsstaatenkonferenz von London plus Tropenwald-Rettungsplan plus Reduktionsziele für fossile Brennstoffe (71). Die Berechnungen wurden für die Klimasensitivitäten 1,5, 2,5 und 4,5 °C durchgeführt. Die Temperaturänderungen sind auf den vorindustriellen Wert von 1860 bezogen.

überschritten werden kann. Bei der größtmöglichen Reduktion der Emissionen, nämlich dem Emissionsstopp, nimmt nach 2100 die Temperatur um nicht mehr als 0,03°C pro Dekade ab. Folglich muß man auch bei keiner anderen, weniger drastischen Reduktion mit einer zu schnellen Temperaturänderung rechnen.

### 3.8 Bewertung der Gesamtwirkung der von der Enquete-Kommission empfohlenen Maßnahmen zur Eindämmung des zusätzlichen Treibhauseffekts

Der mögliche Beitrag von Aktivitäten des Menschen zur globalen Erwärmung sowie die Wirksamkeit von Maßnahmen zu ihrer Eindämmung können mit Hilfe von Szenarienanalysen abgeschätzt werden. Es liegt in der Natur der Sache, daß die komplexe Wirklichkeit nur bis zu einem gewissen Grad reproduziert werden kann. Den Modellergebnissen haftet folglich stets ein Rest Ungenauigkeit an. Bei den gegenwärtigen Modellen wird sie mit der sogenannten Klimasensitivität ausgedrückt, welche die globale Erwärmung infolge einer Verdopplung der CO<sub>2</sub>-Konzentration in der Atmosphäre wiedergibt. Sie liegt zwischen 1,5 und

4,5°C. Bei der Ableitung von sinnvollen Vorsorgemaßnahmen müssen diese Modellunsicherheiten, die zu einer niedrigen, mittleren und hohen Abschätzung der Auswirkungen führen, stets mit in Betracht gezogen werden.

Um die globale Erwärmung abzuschätzen, wurden vier Szenarien zur FCKW-Reduktion und drei Szenarien zur CO<sub>2</sub>-Reduktion entwickelt. (Eine ebenso detaillierte Untersuchung zur Reduktion von CH<sub>4</sub> und N<sub>2</sub>O mußte aus Zeitgründen zunächst zurückgestellt werden.) Diese Untersuchung schließt 14 der wichtigsten Treibhausgase ein, nämlich CO<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub>, N<sub>2</sub>O, FCKW 11, 12, 113, 114, 115, H-FCKW 22, Halon 1301, Tetrachlorkohlenstoff, Methylchloroform, Ozon in der Troposphäre und Wasserdampf in der Stratosphäre. Der Zeitrahmen erstreckt sich von den vorindustriellen Bedingungen des Jahres 1860 bis zum Jahre 2100. Die Ergebnisse der Modellrechnungen (72) sind als Änderungen gegenüber dem vorindustriellen Wert von 1860 dargestellt. Damit wird die Altlast der Aktivitäten vergangener Jahre mit in Betracht gezogen. Bei der Bewertung der Maßnahmen betrachtet die Kommission den Zustand im Jahr 2100 und orientiert sich an einer Erwärmungsobergrenze von 2°C. Die Unsicherheiten in den Modellrechnungen werden für

die mittlere Klimasensitivität von 2,5°C und jeweils in Klammern für die niedrige von 1,5°C und die hohe von 4,5°C mit angegeben.

Die Szenarienanalysen erlauben folgende Schlußfolgerungen (vgl. Abb. 24):

– Ohne Maßnahmen

Bei Fortschreibung der gegenwärtigen Trends (business-as-usual) würde im Jahre 2100 eine mittlere globale Erwärmung von 2,95°C (2,03 bis 4,19) gegenüber dem vorindustriellen Wert erreicht und

damit die Erwärmungsobergrenze von 2°C um 0,95°C (0,03 bis 2,19) überschritten.

Die Kommission hat folgenden Maßnahmenkatalog zur Eindämmung des Treibhauseffekts untersucht:

– Verschärfung des Montrealer Protokolls in der Fassung der 2. Vertragsstaatenkonferenz von London

Das Montrealer Protokoll in der Fassung der 2. Vertragsstaatenkonferenz von London mit Aus-

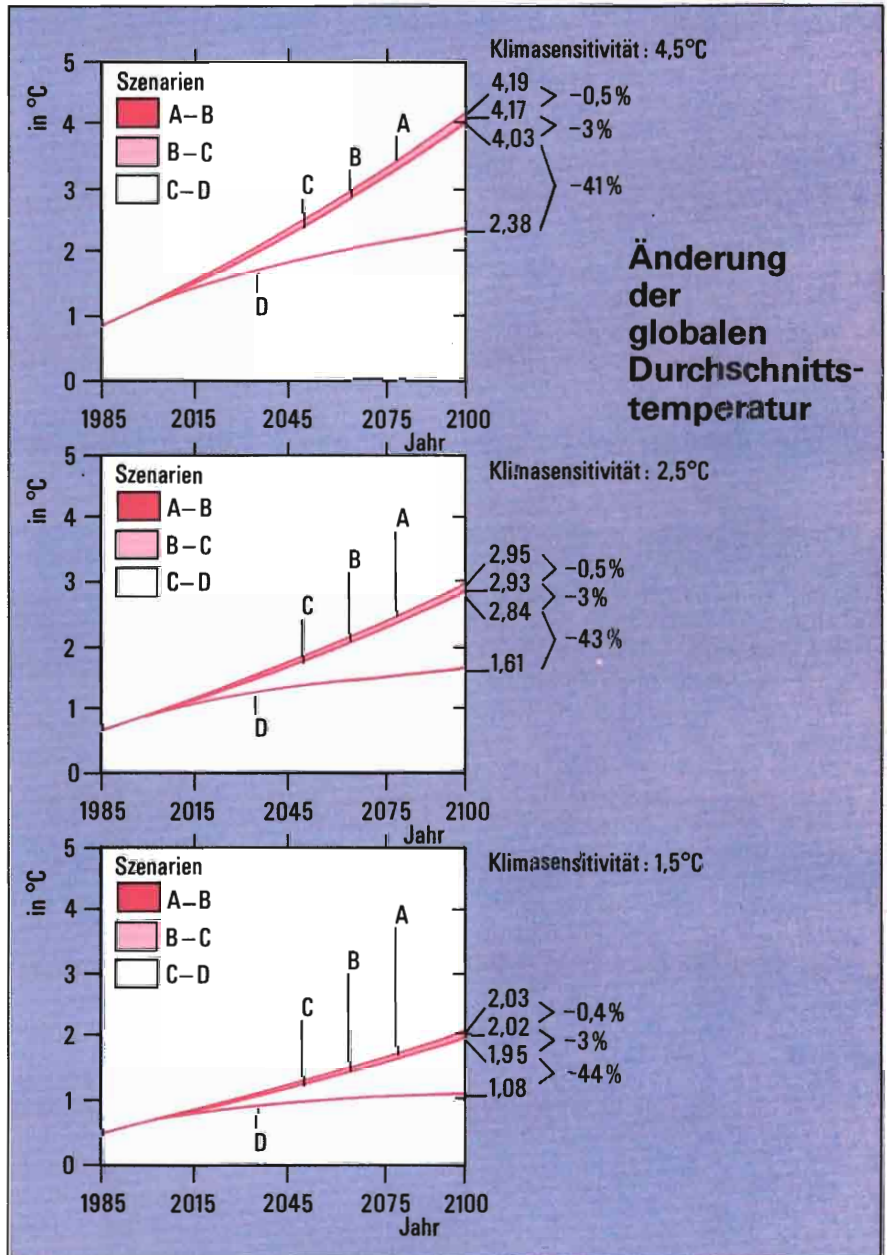


Abb. 24: Die Wirksamkeit der von der Enquete-Kommission empfohlenen Maßnahmen zur Eindämmung des zusätzlichen Treibhauseffekts. A-B: Verschärfung des Montrealer Protokolls; B-C: Tropenwald-Rettungsplan; C-D: CO<sub>2</sub>-Emissionsreduktionsziele für fossile Brennstoffe. Die Temperaturänderungen sind auf den vorindustriellen Wert von 1860 bezogen (72).

nahmeregelungen führt zu einer Beendigung der Produktion von FCKW erst im Jahre 2010 (beziehungsweise 2015 für Methylchloroform) und sieht keine Regelungen für die teilhalogenierten Ersatzstoffe wie H-FCKW 22 vor.

Die Empfehlungen der Kommission führen zur Abschaffung der Ausnahmeregelungen und zu einem Ausstieg der Bundesrepublik Deutschland bis zum Jahre 1995, für die Europäische Gemeinschaft bis 1997 und weltweit bis 2000, sowie zu einem H-FCKW 22-Ausstieg im Jahre 2005.

Die Verschärfung des gegenwärtigen Protokolls in der Fassung der 2. Vertragsstaatenkonferenz von London verringert die globale Erwärmung von 2,95°C (2,03 bis 4,19) auf 2,93°C (2,02 bis 4,17) nur geringfügig. Die Verschärfung ist aber wichtig und notwendig, um den weiteren Abbau der Ozonschicht in der Stratosphäre zu verhindern. Die Erwärmungsobergrenze von 2°C wird selbst bei der niedrigen Klimasensitivität noch nicht unterschritten.

#### – Tropenwald-Rettungsplan

Der im 2. Bericht von der Kommission entwickelte Plan sieht in der ersten Stufe vor, die Vernichtungsrate von 1990 bis 2000 unter die Rate des Jahres 1980 zu senken, in der zweiten Stufe bis spätestens 2010 die Tropenwaldzerstörung zu stoppen und in der dritten Stufe von 2010 bis 2030 den Bestand der Tropenwälder wieder auf den Stand von 1990 zu erhöhen.

Die globale Erwärmung wird dadurch weiter von 2,93°C (2,02 bis 4,17) auf 2,84°C (1,95 bis 4,03) reduziert. Die 2°C-Obergrenze wird bei der niedrigen Klimasensitivität leicht unterschritten. Hier werden nur CO<sub>2</sub> und nicht die vielen anderen, bei der Verbrennung der Wälder emittierten Treibhausgase, betrachtet. Richtig ist, daß die Verbrennung von Primärwald riesige CO<sub>2</sub>-Mengen freisetzt, daß aber durch Aufforstung von Sekundärwald langfristig nur etwa die Hälfte der durch Verbrennung von Primärwäldern freigesetzten CO<sub>2</sub>-Menge aus der Atmosphäre wieder in der Biomasse fixiert wird. Die Erhaltung der Wälder ist aber vor allem deshalb so wichtig, weil sich die Vernichtung noch weit stärker auf das regionale Klima und die Ökologie vor Ort auswirkt als auf das globale Klima, und weil sie den Lebensraum Tropenwald zerstört.

#### – Reduktionsziele für energiebedingten CO<sub>2</sub>-Ausstoß

Die Kommission geht davon aus, daß ihr für die Bundesrepublik Deutschland erstellter Reduktionsplan für die energiebedingten CO<sub>2</sub>-Emissionen mit Verminderungen um 30 Prozent bis 2005, 50 Prozent bis 2020 und 80 Prozent bis 2050 (jeweils bezogen auf 1987) auch auf die wirtschaftsstarke westlichen Industrieländer mit besonders hohen Pro-Kopf-Emissionen übertragen werden kann. Um einigen strukturschwachen Ländern Westeuropas Rechnung zu tragen, wird eine abgeschwächte Reduktion von 20 Prozent bis 2005, 40 Prozent bis 2020 und 80 Prozent bis 2050 vorgeschlagen. Für die Industrieländer Osteuropas ist

aus technischen und finanziellen Erwägungen bis 2005 mit 10 Prozent und bis 2020 mit 30 Prozent eine noch geringere Reduktion, aber bis 2050 mit 80 Prozent die gleiche Verringerung wie für alle anderen Industrieländer vorgesehen. Für die Entwicklungsländer wird aus Gründen der Gleichbehandlung und des Nachholbedarfs eine Zunahme von 50 Prozent bis 2005, 60 Prozent bis 2020 und 70 Prozent bis 2050 als notwendig erachtet. Gleichzeitig wird die Zunahmerate des fossilen Energieverbrauchs verlangsamt, um den Übergang in eine effiziente und erneuerbare Energiewirtschaft zu ermöglichen. Für die Industrie- und Entwicklungsländer zusammengenommen ergeben sich CO<sub>2</sub>-Reduktionen um 5 Prozent bis 2005, 20 Prozent bis 2020 und 50 Prozent bis 2050, wobei eine differenzierte Ermittlung der Reduktionsquoten in den einzelnen Ländern erfolgen muß.

Der zusätzliche Treibhauseffekt wird durch die CO<sub>2</sub>-Reduktionen beträchtlich von 2,84°C (1,95 bis 4,03) auf 1,61°C (1,08 bis 2,38), oder um etwa 40 Prozent reduziert.

Wäre die hohe Klimasensitivität die realistischere, würde die Erwärmungsobergrenze von 2°C mit den Maßnahmen der Kommission noch um 0,4°C oder um etwa 20 Prozent überschritten. Weitergehende Maßnahmen wären erforderlich. Diese könnten in der Reduktion der Emissionen von CH<sub>4</sub> und N<sub>2</sub>O liegen. In den gegenwärtigen Szenarien nehmen von 1985 bis 2100 die CH<sub>4</sub>-Emissionen um 96 Prozent und die N<sub>2</sub>O-Emissionen um 40 Prozent zu. Weitere Modellrechnungen könnten zeigen, welche Kombinationen von CH<sub>4</sub>- und N<sub>2</sub>O-Reduktionen ausreichen, die Erwärmungsobergrenze von 2°C einzuhalten.

Die Ergebnisse setzen ein deutliches Signal für die Prioritäten der einzuleitenden Maßnahmen.

- Wenn sichergestellt ist, daß teilhalogenierte H-FCKW, wie hier angenommen, ab 2040 nicht mehr eingesetzt werden, dann haben weitere, über die Regelungen des Montrealer Protokolls in der Fassung der 2. Vertragsstaatenkonferenz von London hinausgehende Vereinbarungen nur noch eine geringe Wirkung auf die Reduzierung der globalen Erwärmung. Sie sind aber wichtig und notwendig, um die Ozonschicht in der Stratosphäre zu schützen (vgl. Abschnitt D).
- Der Tropenwald-Rettungsplan leistet durch die Verringerung der Abholzung und durch die Einleitung einer gezielten Aufforstung in der ersten Hälfte des 21. Jahrhunderts einen signifikanten Beitrag zur Reduktion des CO<sub>2</sub>-Ausstoßes in die Atmosphäre. Bezogen auf das Endjahr 2100 der Modellrechnungen ist der Beitrag der CO<sub>2</sub>-Reduktion zur Eindämmung des zusätzlichen Treibhauseffekts allerdings relativ gering. Dennoch gebührt der Erhaltung der Tropenwälder schon aus ökologischen Gründen und aus Gründen der Erhaltung des Lebensraums höchste Priorität (73).
- Die Reduktion des energiebedingten CO<sub>2</sub>-Ausstoßes ist mit weitem Abstand die wirkungsvollste Maßnahme zur Eindämmung des Treibhauseffekts. Schnellste Erfolge sind zu erwarten in Industrieländern mit dem größten technischen Know-

how und der höchsten wirtschaftlichen Leistungskraft. Durch technische und wirtschaftliche Hilfe kann auch das große Reduktionspotential in anderen Ländern relativ schnell aktiviert werden.

- Für weiterführende Maßnahmen sind die Treibhausgase CH<sub>4</sub> und N<sub>2</sub>O unbedingt mit in Betracht zu ziehen.

Die Kommission ist der Auffassung, daß sich die Menschheit bei der Eindämmung des zusätzlichen Treibhauseffektes und damit unabsehbarer Auswirkungen auf den Lebensraum, nicht auf die ungewisse Aussicht auf eine möglicherweise niedrige Klimasensitivität verlassen sollte. Sie ist vielmehr der Meinung, daß es das erste Gebot der Vorsorgepflicht ist, alle Unsicherheiten in gleicher Weise in Betracht zu ziehen. Daraus folgt weiterer Handlungsbedarf, um auch

noch bei der hohen Abschätzung die Erwärmungsobergrenze nicht zu überschreiten. Die Kommission empfiehlt daher dem Deutschen Bundestag, in der Folge vor allem den Bereich „Landwirtschaft/Welter-nährung“ vertieft zu untersuchen, um dort beste-hende Reduktionspotentiale für CH<sub>4</sub> und N<sub>2</sub>O ausfindig zu machen und entsprechende Handlungsvor-schläge zu erarbeiten.

#### 4. Ergebnisse aus 1,5-dimensionalen Szenarienrechnungen

Mit dem Mainzer 1,5-D-Chemieklimamodell (Klima-sensitivität etwa 2 °C; genaue Beschreibung des Mo-dells siehe Abschnitt D, 3. Kap., Nr. 1) wurden sechs Szenarien (vgl. Nr. 1.4) zu vollhalogenierten und teil-

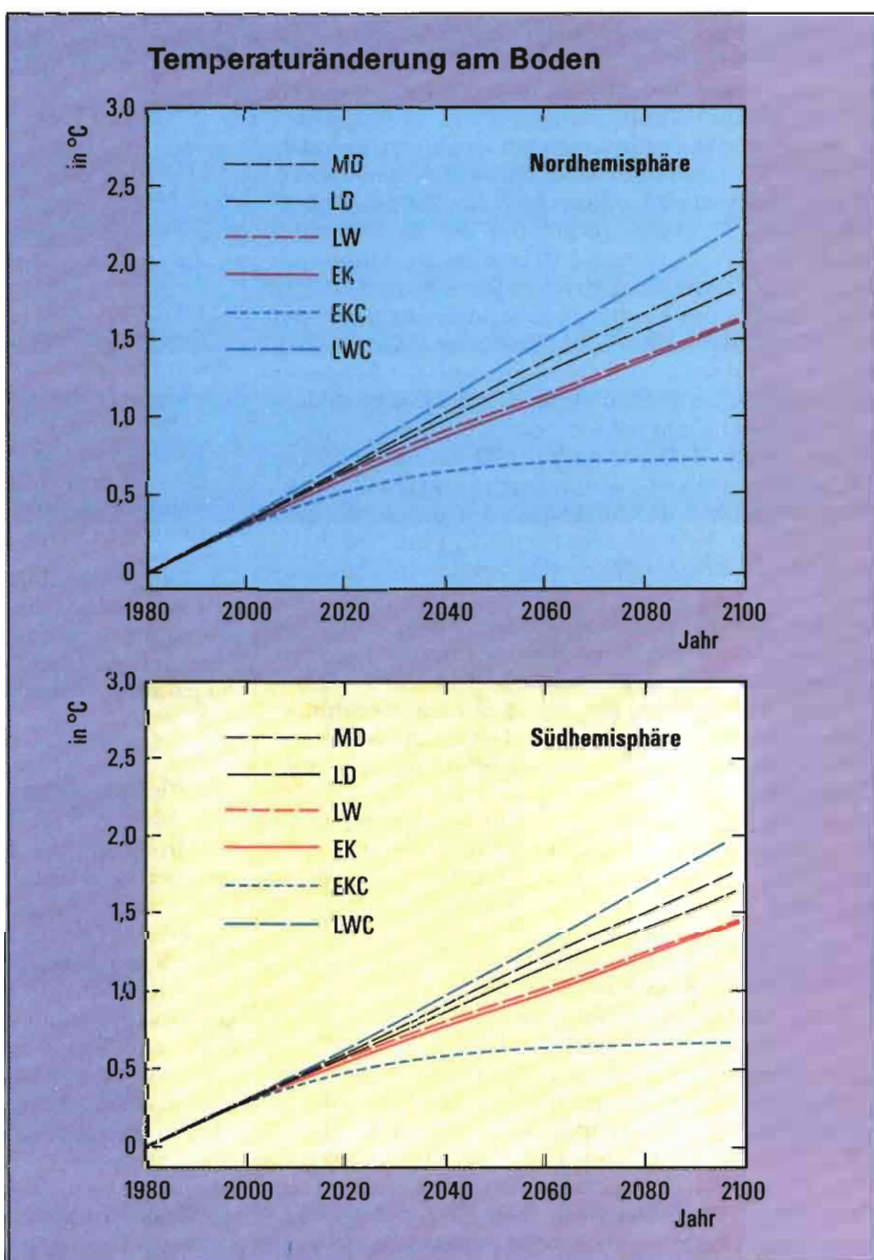


Abb. 25: Zunahme der globalen Mitteltemperatur für die 6 im Text beschriebenen Szenarien (74)

halogenierten FCKW einschließlich der extremen Klimaszenarien untersucht.

Die berechneten Temperaturänderungen in Bodennähe auf beiden Hemisphären sind in Abbildung 25 dargestellt. Die Erwärmung ist wegen des höheren Anteils des troposphärischen Ozons und des geringeren Ozeananteils auf der Nordhalbkugel stärker als auf der Südhalbkugel. Die untere Kurve, die mit „EKC“ gekennzeichnet ist, wurde für reduzierte CO<sub>2</sub>-, CH<sub>4</sub>- und N<sub>2</sub>O-Emissionen nach dem IPCC-Szenario Dr berechnet, die obere mit „LWC“ gekennzeichnete für die CO<sub>2</sub>-, CH<sub>4</sub>- und N<sub>2</sub>O-Emissionen nach IPCC-Szenario BAU (vgl. Nr. 1.3). Szenario LWC entspricht, abgesehen von H-FCKW 22, Szenario A; Szenario EKC etwa Szenario D, allerdings mit Berücksichtigung von zusätzlichen Reduktionen bei den CH<sub>4</sub>- und N<sub>2</sub>O-Emissionen. Bei den anderen Kurven wird davon ausgegangen, daß die gegenwärtigen Wachstumsraten der Konzentrationen von CO<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub> und N<sub>2</sub>O anhalten (vgl. Abschnitt D). Szenario MD berücksichtigt das Montrealer Protokoll ohne Ausnahmeregelungen. In diesem Szenario wird angenommen, daß in der Dritten Welt der Pro-Kopf-Verbrauch an Kühlmitteln bis zum Jahre 2030 auf den jetzigen Stand in den Industrieländern steigt, daß aber H-FCKW 22 verwendet wird. Diese Zunahme des H-FCKW 22-Einsatzes bedeutet im Jahre 2100 fast 0,2°C zusätzliche Temperaturerhöhung durch nahezu 3 ppbv H-FCKW 22, also fast 10 Prozent des Gesamteffekts. Eine Einstellung der Produktion aller FCKW einschließlich des Methylchloroform bis 2000 und der H-FCKW ab dem Jahre 2005 (Szenarien EK und EKC), entsprechend der verschärften Fassung der Londoner Vereinbarungen des Montrealer Protokolls nach dem Vorschlag der Kommission, verringert den Temperaturanstieg bis 2100 gegenüber MD um fast 0,4°C in der Nordhemisphäre. Wenn gleichzeitig die Emissionen der anderen Treibhausgase verringert werden, ergibt sich in diesem Szenario (EKC) eine Stabilisierung des Treibhauseffekts. Die Londoner Vereinbarungen des Montrealer Protokolls mit Ausweitungen des H-FCKW 22-Einsatzes wie in Szenario MD und mit Ausnahmeregelungen von Ausnahmeregelungen bedeutet gegenüber dem ursprünglichen Montrealer Protokoll dagegen nur eine Verringerung des Temperaturanstiegs um 0,15°C (Szenario LD). Der vorübergehende Einsatz von H-FCKW 22 bis 2040 bringt bis 2030 eine Verstärkung des Treibhauseffektes um etwa 0,05°C (Szenarios LW und LWC), ist also mittelfristig nicht vernachlässigbar, was umso mehr gelten würde, wenn man, wie bei Szenario A, ein starkes Wachstum zulassen würde.

## 5. Ergebnisse der gekoppelten Ozean-Atmosphäre-Modelle

Die beiden Hamburger Ozeanmodelle (LSG und OPYC) sind jeweils mit dem gleichen dreidimensionalen Modell der Zirkulation der Atmosphäre (ECHAM) gekoppelt worden. Letzteres ist eine in Hamburg modifizierte Version des Klimamodells des Europäischen Zentrums für Mittelfristvorhersage in Reading, England. Damit stehen zwei gekoppelte Modelle zur Verfügung, die uns wesentliche Fragen im Zusammenhang mit Klimaänderungen bei Spurengaszunahme

beantworten können. Im folgenden sollen – auch im Vergleich mit den Ergebnissen der bisherigen Gleichgewichtsrechnungen – vier Fragen anhand der Ergebnisse gekoppelter Modelle beantwortet werden:

1. Wie stark verzögert der Ozean eine globale Wirkung erhöhter Spurengaskonzentration?
2. Welche Erwärmung tritt auf, wenn die volle Reaktion auf beispielsweise eine Verdoppelung des äquivalenten CO<sub>2</sub>-Gehaltes erreicht ist?
3. Wie sieht der zeitliche Verlauf einer Erwärmung aus, wenn bestimmte Spurengasanstiege, also beispielsweise die Szenarien BAU und Dr des IPCC, vorgegeben werden?
4. Kann die regionale Verteilung der Erwärmung und die Niederschlagsverteilung wenigstens grob angegeben werden?

Für folgende Spurengasanstiege ist jeweils ein Rechenlauf mit beiden gekoppelten Modellen vorhanden, der mit dem Kontrolllauf für gegenwärtiges Klima verglichen werden kann:

- a. Verdoppelung des äquivalenten CO<sub>2</sub>-Gehaltes bei Start des Modellaufes (2 x CO<sub>2</sub> Empfindlichkeitsstudie), Kopplungszeit 40 Jahre, im folgenden als Szenario 2 x CO<sub>2</sub> bezeichnet.
- b. IPCC-Szenario BAU (vgl. Nr. 1.3); Kopplungszeit 50 Jahre für ECHAM/OPYC.
- c. IPCC-Szenario Dr, dessen Hauptmerkmal eine so drastische Reduktion der Emission von Spurengasen ist, daß keine Verdoppelung des äquivalenten CO<sub>2</sub>-Gehaltes und Stagnation des Spurengasgehaltes bei etwa 180 Prozent des vorindustriellen Wertes des CO<sub>2</sub>-Gehaltes (1990 wurden etwa 150 Prozent erreicht) in der Mitte des nächsten Jahrhunderts eintritt; Kopplungszeit 30 Jahre mit ECHAM/LSG.

Die Länge der Kopplung entspricht noch nicht voll den Wünschen, sie erreichte jedoch bei Redaktionsschluß für diesen Bericht durch bevorzugte Behandlung auf dem Großrechner des Deutschen Klimarechenzentrums zum Teil bereits 50 Jahre.

### 5.1. Globale Mitteltemperatur

Die große Spanne der Unsicherheit bei der mittleren globalen Erwärmung in Oberflächennähe, die aus Gleichgewichtsrechnungen bekannt ist und die wesentlich von der Unsicherheit bei der Darstellung der Bewölkung herkommt, kann durch die gekoppelten Modelle noch nicht eingengt werden. Wohl aber kann die Frage, ob und wann der Gleichgewichtswert des zugehörigen Atmosphäremodells erreicht wird, beantwortet werden. So zeigt Abbildung 26 a für die Modellkombination ECHAM/OPYC, daß nach der spontanen CO<sub>2</sub>-Verdoppelung am Beginn des Rechenlaufes der zunächst sehr rasche Temperaturanstieg um etwa 1,6°C in den ersten zehn Jahren auf 0,8°C im zweiten Jahrzehnt und 0,3°C im dritten abklingt und schon nach 40 Jahren annähernd 3°C Temperaturzunahme erreicht sind. Daß dies annähernd dem Gleichgewichtswert des Atmosphäremodells



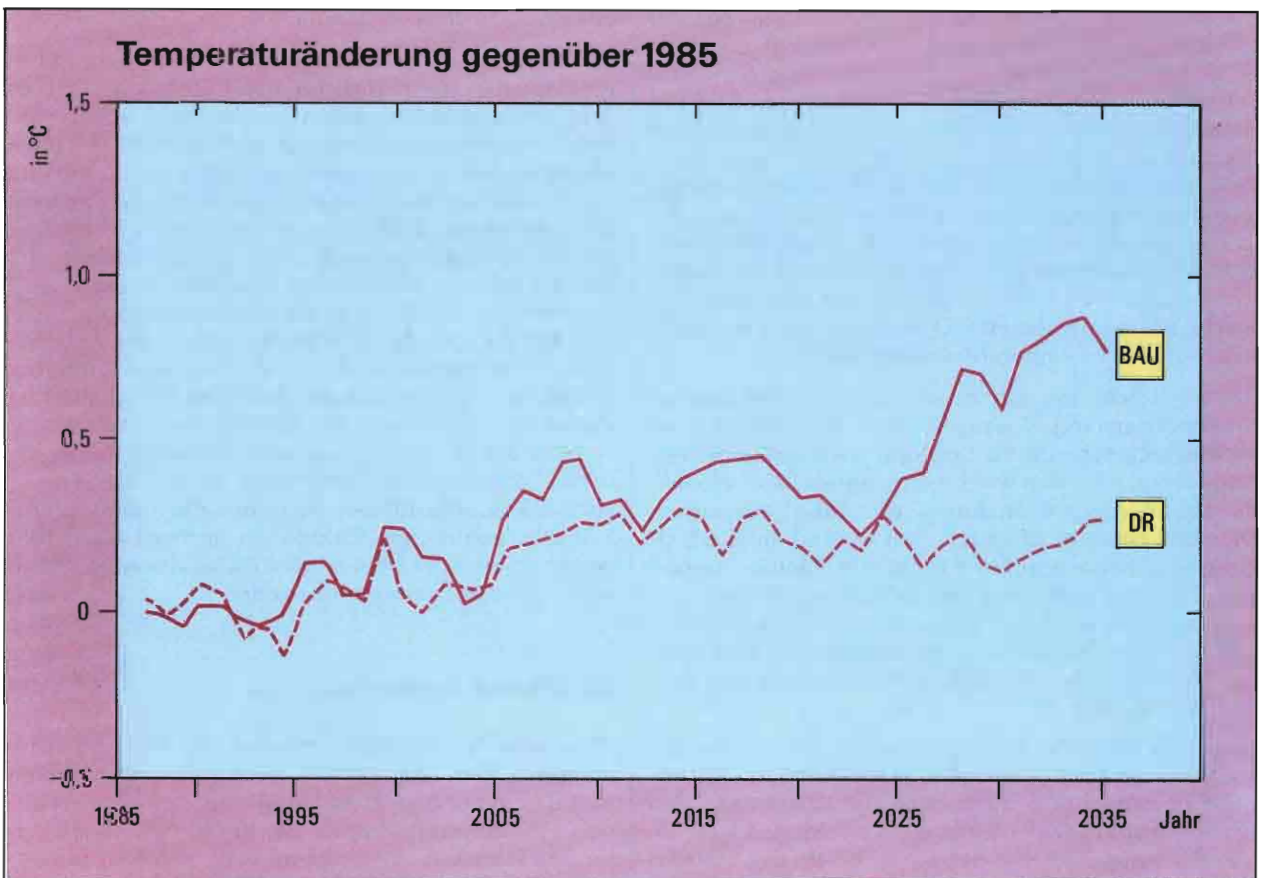
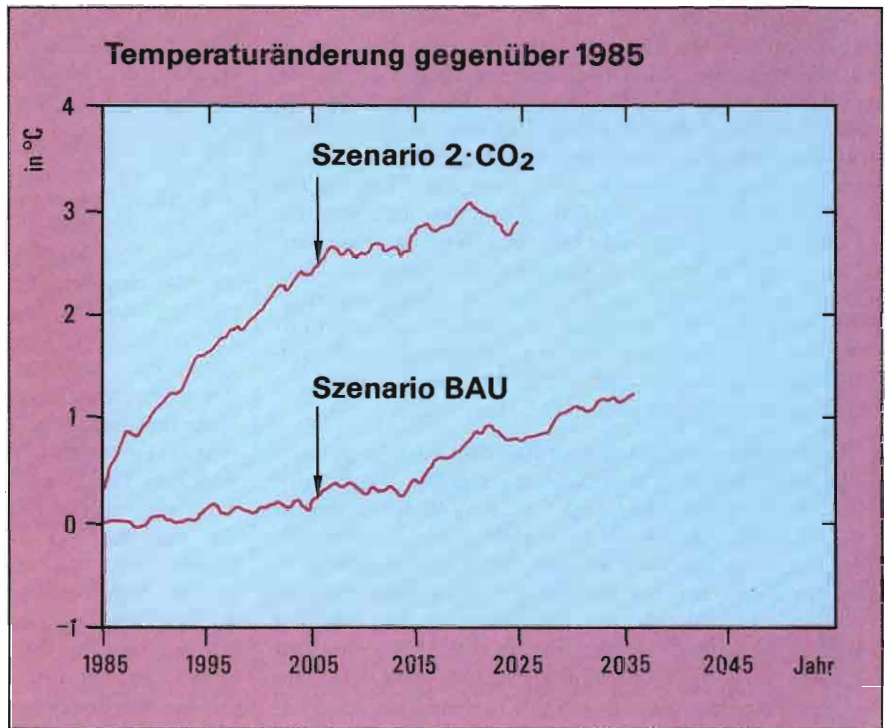


Abb. 26: Erwärmung nach den Szenarien 2 \* CO<sub>2</sub> sowie IPCC-BAU und Dr (75).  
 Zeitliche Änderung der globalen Mitteltemperatur in Oberflächennähe im Vergleich zum Kontrolllauf für  
 a. das Modell ECHAM/OPYC und  
 b. ECHAM/LSG  
 Dargestellt ist ein gleitendes Jahresmittel.

entsprechen sollte, geht aus der Zeitreihe des in den Ozean gerichteten zusätzlichen Wärmeflusses hervor: Er sinkt von etwa 2,5 Watt pro m<sup>2</sup> zu Beginn auf Werte um 0,3 Watt pro m<sup>2</sup> im Jahr 40 ab. Die Verzögerung beträgt also in diesem fiktiven Fall einige Jahrzehnte, und die erreichte Erwärmung ist schon nach 40 Jahren im aus Gleichgewichtsmodellrechnungen bekannten Bereich. Leider ist der exakte Gleichgewichtswert für das Modell ECHAM nicht bekannt, weil es bisher nur für den realistischen Fall einer Kopplung mit dem Ozean verwendet worden ist. Aus vergleichenden Empfindlichkeitsstudien mit insgesamt 19 Atmosphärenmodellen, zum Beispiel bei erhöhter Einstrahlung, ist jedoch bekannt, daß ECHAM einen Gleichgewichtswert oberhalb von 3°C haben sollte.

Betrachtet man die Erwärmung in den 50 Jahren nach 1985 bei Annahme des Szenarios BAU, dann wird zweierlei klar. Erstens steigt die Temperatur um mehr als 1°C, also rascher als je aus der Klimageschichte bekannt, und zweitens nimmt die Anstiegsrate (wegen der Zunahme der emittierten Spurengasmenge) mit der Zeit zu. Diese untere Kurve in Abbildung 26 a enthält aber die Reaktion auf die bis 1985 aufgelaufene Störung nicht, da die Rechnung erst mit dem Jahre 1985 begann, so daß in Wirklichkeit bis 2035 bei unverändertem Verhalten der Menschheit und bei mittlerer Klimaempfindlichkeit ein Temperaturzuschlag in der Größenordnung von einigen Zehntel Grad vorgenommen werden muß, der auf die noch nicht in Erwärmung an der Oberfläche überführte Störung vor 1985 zurückgeht. Vorsichtig formuliert bedeutet das: etwa 1,5°C Erwärmung im globalen Mittel bis zum Jahre 2035 bei mittlerer Klimaempfindlichkeit. Daß im Jahre 2035 ein noch weiterer starker Temperaturanstieg schon angelegt ist, zeigt auch der in den Ozean gerichtete zusätzliche Wärmefluß, welcher von 0 Watt pro m<sup>2</sup> im Jahre 1985 auf etwa 1 Watt pro m<sup>2</sup> anwächst. Dies entspricht etwa 40 Prozent Zuwachs des äquivalenten CO<sub>2</sub>-Gehaltes und damit einem weiteren Temperaturanstieg um 1°C.

Bei der Rechnung mit einem drastisch reduzierten Spurengasanstieg, also mit Szenario Dr, sind die Temperaturunterschiede zu Szenario BAU zunächst gering; erst nach etwa zwei Jahrzehnten ist ein Erfolg der Minderungsmaßnahmen eindeutig erkennbar. Dies unterstreicht drastisch, daß es ein Fehler ist, sicherere Aussagen auf der Basis von Beobachtungen und Klimamodellen vor einer Entscheidung zur Eindämmung der Spurengasemission zu fordern. Nur wer früh entscheidet, wird den Temperaturanstieg in der Mitte des nächsten Jahrhunderts wesentlich vermindern können.

Die Frage nach der Verzögerung des Temperaturanstieges kann nicht pauschal mit einer einzigen Zeitangabe beantwortet werden, weil die Erwärmung des Ozeans nicht überall gleichmäßig erfolgt und weil die Verzögerung auch von der Zuwachsrate der Spurengasemission abhängt. Nach einer Erwärmung der Deckschicht, die bei einer typischen Mächtigkeit von 100 Metern und bei einer Wärmekapazität von umgerechnet etwa 30 Atmosphären selbst schon eine beträchtliche Verzögerung bewirken kann, werden die besonders im Winter tiefer mischenden Teile des Ozeans einen Teil der Erwärmung noch länger verzögern können. Dies deutet sich im 2 \* CO<sub>2</sub>-Modellauf durch

den nach 40 Jahren noch immer in den Ozean gerichteten zusätzlichen Wärmefluß an, das heißt, Teile der angelegten Erwärmung werden um mehr als 40 Jahre verzögert.

Ob die Kopplung mit dem Ozean die „Gleichgewichts“erwärmung des zugehörigen Atmosphärenmodells dämpft oder verstärkt, ist eindeutig noch nicht zu beantworten, weil die Kopplungszeit dafür noch zu gering ist. Allerdings sollten die Abweichungen von der Gleichgewichtserwärmung klein sein, denn sonst müßten die Erwärmung von mehr als 3°C nach 40 Jahren im 2 \* CO<sub>2</sub>-Modellauf in Abbildung 26 und der zugehörige Restwärmefluß in den Ozean stärker von der einfachen Relation, daß ein Anstieg der Strahlungsflußdichte in Bodennähe um 2,5 Watt pro m<sup>2</sup> einem Temperaturanstieg von 3,5°C entspricht, abweichen. Da der Ozean nur Wärme umverteilt, könnte eine wesentliche Dämpfung oder Verstärkung der Erwärmung nach Ankopplung des Ozeans nur dann auftreten, wenn dadurch andere Rückkopplungen drastisch verändert würden. Beispielsweise könnten sich die Höhe und optische Dicke der Wolken systematisch ändern oder das Meereis weitaus stärker oder schwächer zurückgehen. Dies deutet sich beim Vergleich der beiden gekoppelten Modelle an. Die Modellkombination ECHAM/LSG zeigt systematisch geringere Erwärmung. Eine Zuordnung zu bestimmten Phänomenen ist noch nicht möglich.

Die Eigenschaft der gekoppelten Ozean-Atmosphären-Modelle, die natürliche Variabilität von Jahr zu Jahr annähernd korrekt zu beschreiben, ist sehr gut dokumentiert in Abbildung 26 b. Danach ist erst nach etwa vier Jahrzehnten eine eindeutige Trennung von Ergebnissen für Szenario BAU von denen für Szenario Dr zu erkennen. Hätte man einen zweiten Modellauf für jedes Szenario gemacht, hätte der Unterschied von Jahr zu Jahr ebenfalls in der Größenordnung 1 bis 2 Zehntelgrad für die globale Mitteltemperatur gelegen. Bei der Kopplung ECHAM/LSG ist der systematisch schwächere Anstieg als bei der Kopplung ECHAM/OPYC noch nicht einzelnen physikalischen Prozessen zuzuordnen. Die Differenz von etwa 1,2 °C zu etwa 0,8 °C Erwärmung nach 50 Jahren (ohne die nach 1985 realisierte Erwärmung, die auf die Störung vor 1985 zurückzuführen ist) deutet die hohe Variabilität der ozeanischen Zirkulation in den beiden Modellen an, denn es ist in beiden Fällen dasselbe Atmosphärenmodell verwendet worden.

## 5.2 Globaler Niederschlag

Steigende Temperaturen erhöhen die Wasserdampfmenge in der Atmosphäre. Dies sollte im globalen Mittel zu mehr Niederschlag führen, denn bei erhöhtem Treibhauseffekt muß, um Energiegleichgewicht für den Planeten zu erreichen, mehr Wasser pro Zeiteinheit verdunsten oder die Strahlung in fühlbare Wärme umgewandelt und anschließend in höhere Schichten der Atmosphäre transportiert werden, damit die Atmosphäre den höheren Wärmestrahlungsverlust ausgleichen kann. Da ein größerer Teil der Strahlung durch die Verdunstung aufgebraucht wird ist es wahrscheinlich, daß mehr Wasser pro Zeiteinheit verdunstet. Die physikalische Grundforderung, daß

die Atmosphäre den erhöhten Wärmestrahlungsverlust durch Kondensationswärme ausgleichen kann, muß in allen Klimamodellrechnungen erfüllt werden, so auch bei den Hamburger gekoppelten Modellen. Die globale Niederschlagsmenge steigt im Szenario BAU im fünften Jahrzehnt, also von 2026 bis 2035, um etwa 2 Prozent. Da die globale Mitteltemperatur gleichzeitig um etwas mehr als 1°C stieg, sollte im 2 \* CO<sub>2</sub>-Modellauf bei 3°C Temperaturzunahme eine höhere Niederschlagszunahme auftreten. Tatsächlich wird sie zu etwa 7 Prozent berechnet. Das Hamburger gekoppelte Modell ECHAM/OPYC, für das diese Auswertung bisher gemacht wurde, läßt also bei Erwärmung durch erhöhten Spurengasgehalt den Niederschlag etwas weniger steigen als die ungekoppelten Atmosphärenmodelle. Auch deutet sich in den zeitabhängigen Rechnungen eine Tendenz an, daß die Kontinente trockener werden.

### 5.3 Grobe regionale Verteilung

Die wesentlichste und physikalisch sehr plausible Änderung, die gekoppelte Klimamodelle gegenüber bisherigen Rechnungen mit Atmosphärenmodellen brachten, lautet: Je höher der Ozeananteil und je tiefer die Mischung im Ozean, umso stärker wird die Erwärmung in diesem Gebiet verzögert, das heißt, es sollte bei 2 \* CO<sub>2</sub>-Modellläufen in den ersten Jahrzehnten und durchgehend bei zeitabhängiger exponentieller Spurengaszunahme, wie im Szenario BAU, folgendes zu sehen sein:

1. Asymmetrie der Reaktion der beiden Erdhälften wegen langsamerer Erwärmung der südlichen;
2. geringe Erwärmung in tief mischenden Ozeanteilen wie dem Zirkumpolarstrombereich in 40 bis 60°S, und ebenfalls eine geringe Erwärmung provoziert durch die tiefen ozeanischen Deckschichten in der Atmosphäre im Gebiet des Aläuten – beziehungsweise des Islandtiefs;
3. stärkere Erwärmung im Inneren der Kontinente als in Küstennähe;
4. besonders starke Erwärmung in sehr hohen Breiten der nördlichen Hemisphäre;
5. Niederschlagszunahme in den inneren Tropen;
6. Aufrechterhalten der Temperaturdifferenz zwischen Äquator und mittleren nördlichen Breiten in der Übergangsphase, und damit keine Abnahme der Geschwindigkeit des Subtropenstrahlstroms in der obersten Troposphäre;
7. keine generelle Feuchtezunahme in Trockenzonen.

Diese aus der einfachen obigen Annahme mit einfachen physikalischen Überlegungen folgenden groben regionalen Klimaänderungen können alle in den Modellergebnissen wiedergefunden werden. So unterstreicht Abbildung 27 mit der zeitabhängigen und breitenabhängigen Temperaturänderung bei Szenario BAU für die Modellkombination ECHAM/OPYC, daß allgemein geringe Erwärmung in der südlichen Hemisphäre und fast gleichmäßige Erwärmung in der nördlichen Hemisphäre bis etwa 50°N auftritt, daß

maximale Erwärmung, aber auch maximale Variation im nördlichen Polargebiet zu sehen ist. Die zugehörige Verteilung der Temperaturänderung an der Erdoberfläche stellt die stärkere Erwärmung des Inneren der Kontinente und die verzögerte Erwärmung in Gebieten mit starker ozeanischer Mischung klar heraus (vgl. Abb. 28).

Die im Laufe der Simulation auftretenden Besonderheiten im Gebiet mit Meereis (zum Beispiel in der Weddell-See) bedürfen einer eigenen Erläuterung, nicht weil sie verlässliche regionale Besonderheiten darstellten, sondern weil sie auf den zentralen Schwachpunkt der bisherigen Modellierung hinweisen. Die Modellierkunst ist besonders gefordert, wenn eine von Ozeanströmung und Stürmen transportierte und verformte, stark isolierende, die Reflexion von Sonnenlicht dominierende und Verdunstung verhin- dernde Meereisschicht an der richtigen Stelle mit richtiger Mächtigkeit und richtigen offenen Stellen erscheinen soll. Das gelingt bisher nicht zufriedenstellend. Deshalb sollte diesen Besonderheiten an der Meereisgrenze zwar die Aufmerksamkeit des Modellierers gelten, der Leser dieses Berichtes sollte die Resultate aber nicht als ernstzunehmende Regionalisierung verstehen.

Der Wasserkreislauf wird in den beiden verschiedenen Modellkombinationen regional unterschiedlich verändert. Eine allgemeine Aussage kann jedoch gemacht werden: Der zonal gemittelte Niederschlag nimmt im Szenario BAU in hohen Breiten fast überall, in den inneren Tropen der nördlichen Erdhälfte kräftig zu, in subtropischen Gebieten der Südhemisphäre leicht ab und auf der nördlichen Erdhälfte leicht zu (vgl. Abb. 29). Wird dagegen das 2 \* CO<sub>2</sub>-Empfindlichkeitsszenario betrachtet, ist die zonal gemittelte Niederschlagsänderung verschoben, denn das Maximum der Zunahme in den Tropen liegt um etwa 15 Breitengrade südliche und die südliche Erdhälfte, die bei Szenario BAU nur sehr geringe Niederschlags- erhöhung aufwies, empfängt ebenfalls viel mehr Niederschlag in höheren mittleren Breiten. Diese Veränderung wird bei Betrachtung der Abbildung 27 verständlich. Während in Szenario BAU die gesamte südliche Hemisphäre sehr stark verzögert reagiert, ist die Erwärmung bei Szenario 2 \* CO<sub>2</sub> in mittleren und hohen Breiten der südlichen Erdhälfte recht kräftig, so daß daraus eine Niederschlagszunahme bei erhöhter Verdunstung folgen sollte.

Die regionale Verteilung der Niederschlagsänderung sollte sehr vorsichtig interpretiert werden. So unterstreicht die Niederschlagsänderung in Abbildung 30 trotz der vielen auf Skalen von 1000 bis 2000 km auftretenden positiven oder negativen Werte im wesentlichen nur das schon über die zonal gemittelten Änderungen Gesagte. Ein Aspekt kommt jedoch hinzu, nämlich die kräftige Erhöhung des Niederschlags in Südostasien im Bereich des indischen Sommermonsuns, die sowohl im Szenario BAU als auch im Szenario 2 \* CO<sub>2</sub> erscheint.

Die Diskussion der Parameter Bodenfeuchte und Meereis soll hier entfallen, weil eine mit physikalischen Argumenten untermauerte Interpretation wegen der Modellschwächen bei der Berechnung der

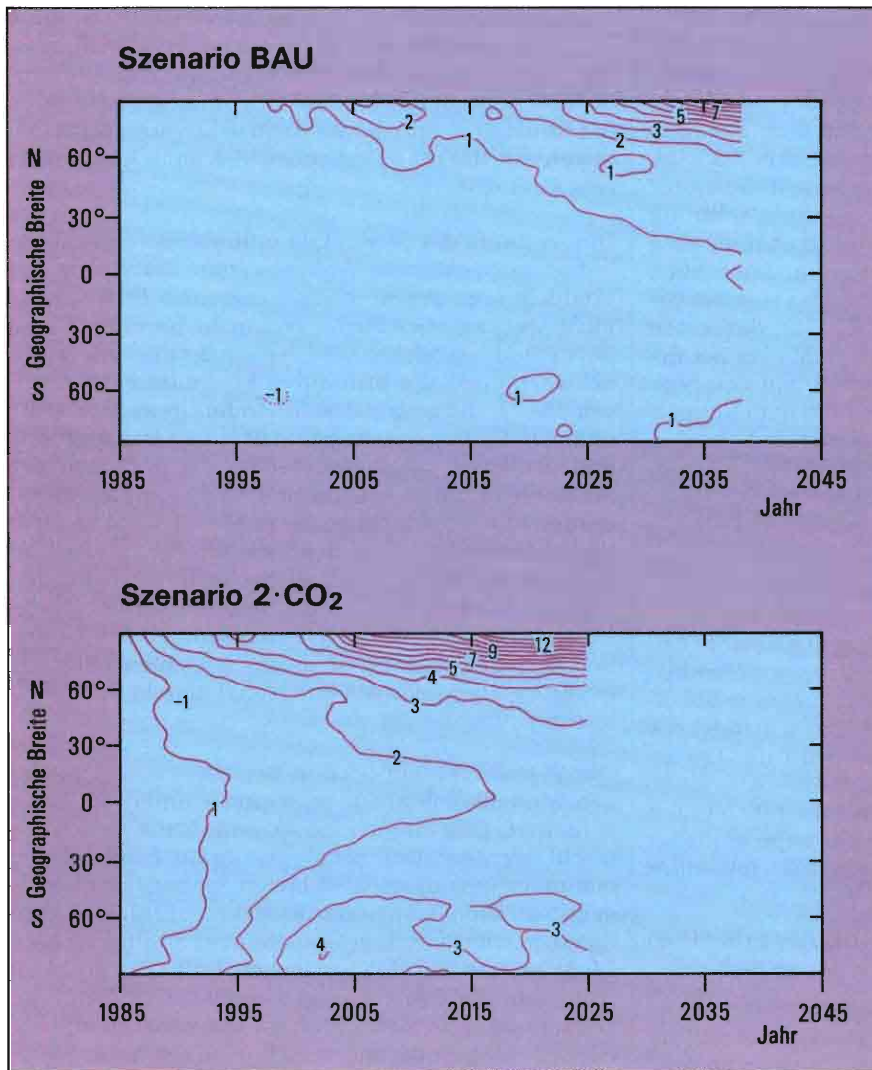


Abb. 27: Breitenabhängigkeit der Erwärmung (76).

Zeitliche Änderung der zonal gemittelten Lufttemperatur in 2 m Höhe für ECHAM/OPYC aufgetragen als Funktion der geographischen Breite für die Szenarien

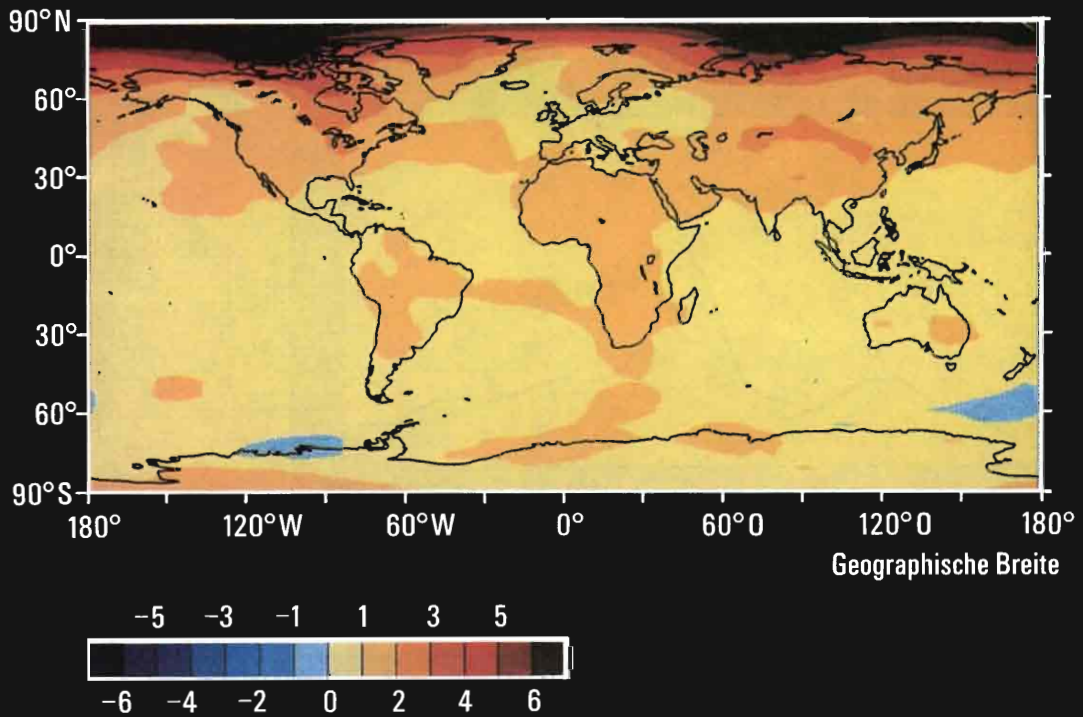
- a. IPCC-BAU und
- b.  $2 \times \text{CO}_2$ .

Bodenfeuchte und der Meereisausdehnung noch nicht gelingt. Dazu sind weitere Rechenläufe und eine detailliertere Interpretation des bisherigen Modelllaufs notwendig, wozu nicht ausreichend Zeit war.

Neben der Bestätigung, daß sich eine Erwärmung bei erhöhtem Treibhauseffekt der Atmosphäre gegenüber den Vorhersagen der bisherigen, einfachen eindimensionalen gekoppelten Modellen verzögert, und neben der etwa gleichen Erwärmung wie in Gleichgewichtsrechnungen mit Zirkulationsmodellen der Atmosphäre und der Zunahme des mittleren globalen

Niederschlags geben die ersten gekoppelten Modelle viele weitere Einblicke in die Reaktion des Klimasystems bei vorgegebener veränderter Zusammensetzung der Atmosphäre. Sie gestatten zeitabhängige Rechnungen, sie liefern die grobe Regionalisierung der Wärmesenke Ozean und damit die Asymmetrie der Reaktion beider Erdhälften, sie liefern die überdurchschnittliche Erwärmung im Inneren der Kontinente, und sie werden bei Verbesserung der Parameterisierung von Effekten der Wolken, des Meereises und der Landvegetation den Weg zu einer verlässlicheren Regionalisierung ebnen.

## Erwärmung 1985 – 2030 in Szenario BAU



## Erwärmung 1985 – 2030 in Szenario 2 · CO<sub>2</sub>

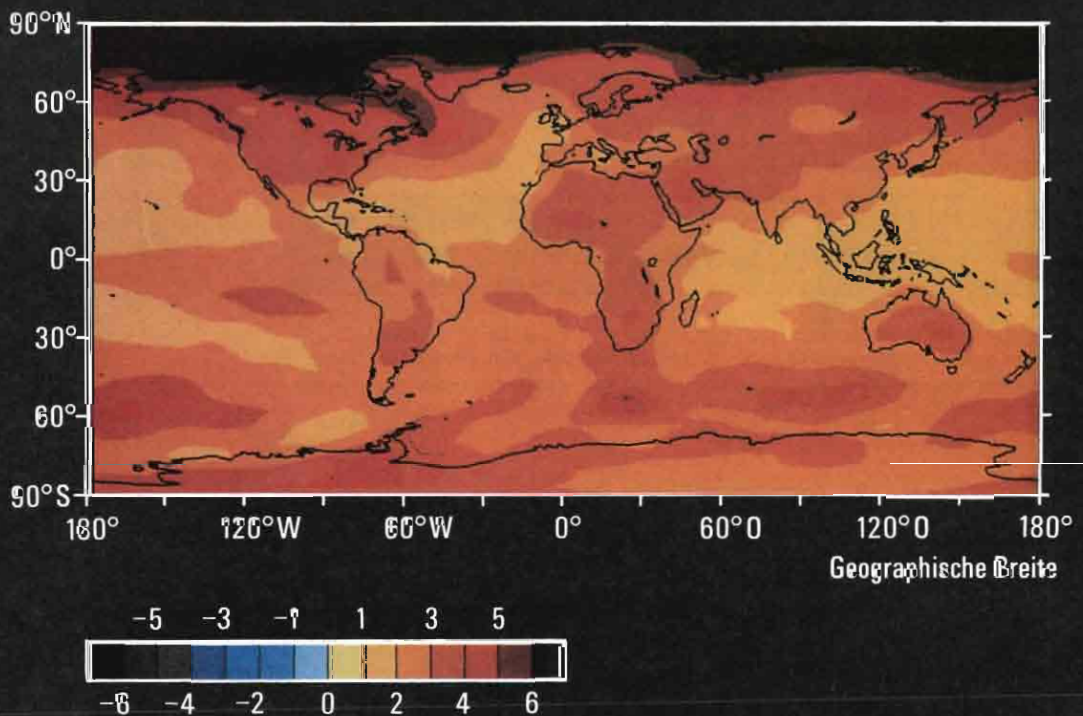


Abb. 28: Regionale Verteilung der Erwärmung (77).

Regionale Verteilung der Temperaturänderungen für die Kopplung ECHAM/OPYC im 4. Jahrzehnt der Kopplung bei 2 · CO<sub>2</sub> und im 5. Jahrzehnt für das IPCC-Szenario BAU.

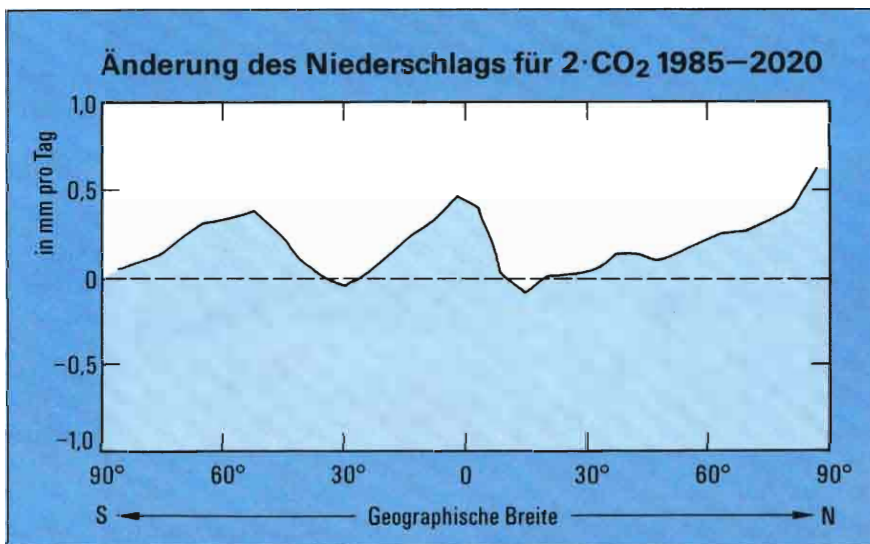
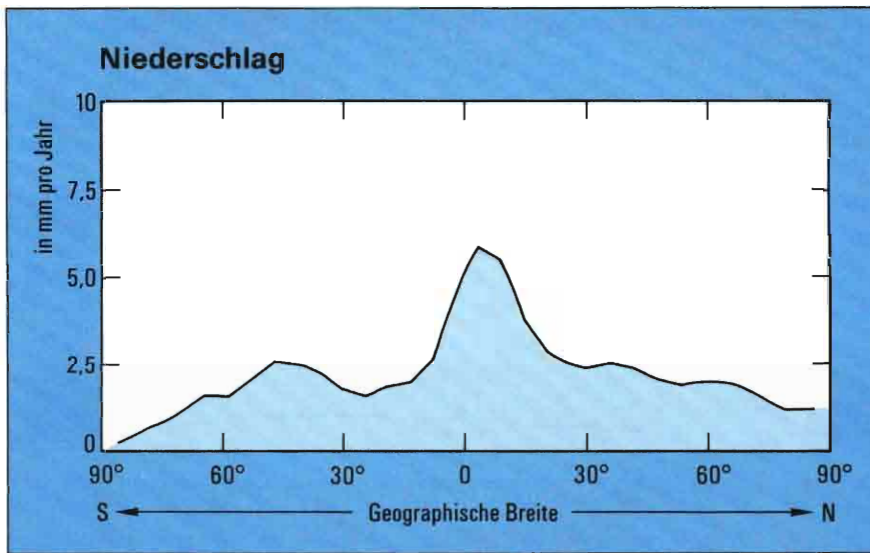
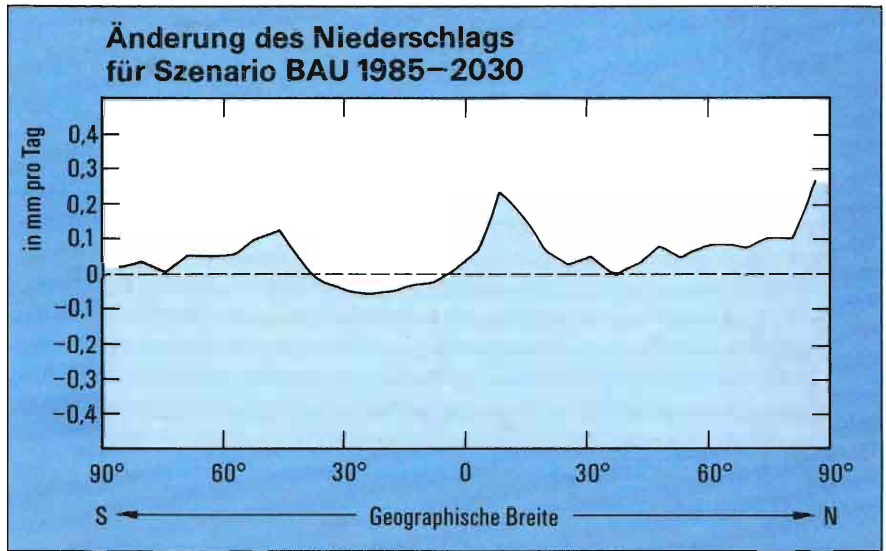


Abb. 29: Änderungen des Niederschlags nach den Szenarien 2 x CO<sub>2</sub> und IPCC-BAU (78).  
 a. Zonal gemittelte Niederschlagsmenge für gegenwärtiges Klima in mm pro Tag;  
 b. Niederschlagsänderung für das Szenario 2 \* CO<sub>2</sub> für das 4. Jahrzehnt nach Beginn der Kopplung der Modelle ECHAM und OPYC und



c. für das IPCC-Szenario BAU für das 5. Jahrzehnt nach Beginn der Kopplung.

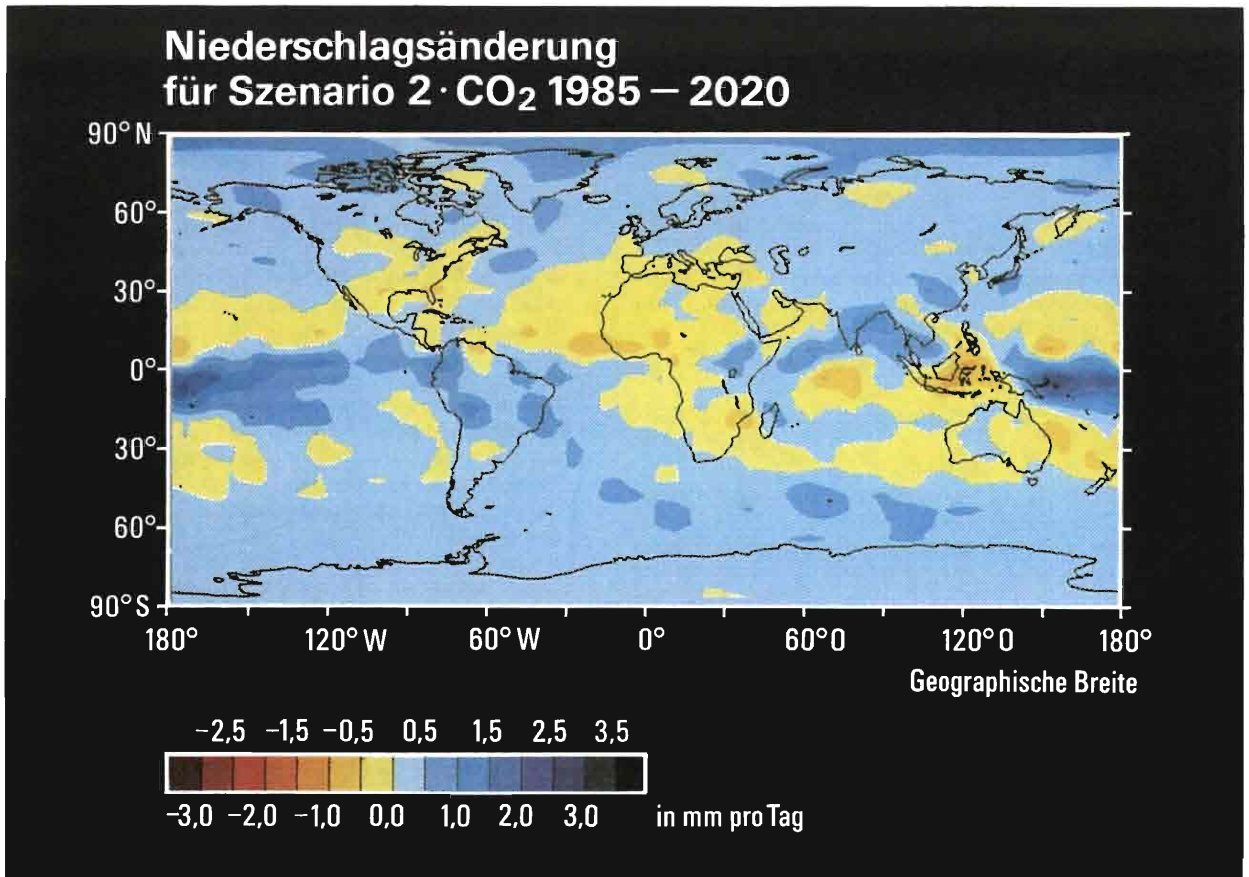
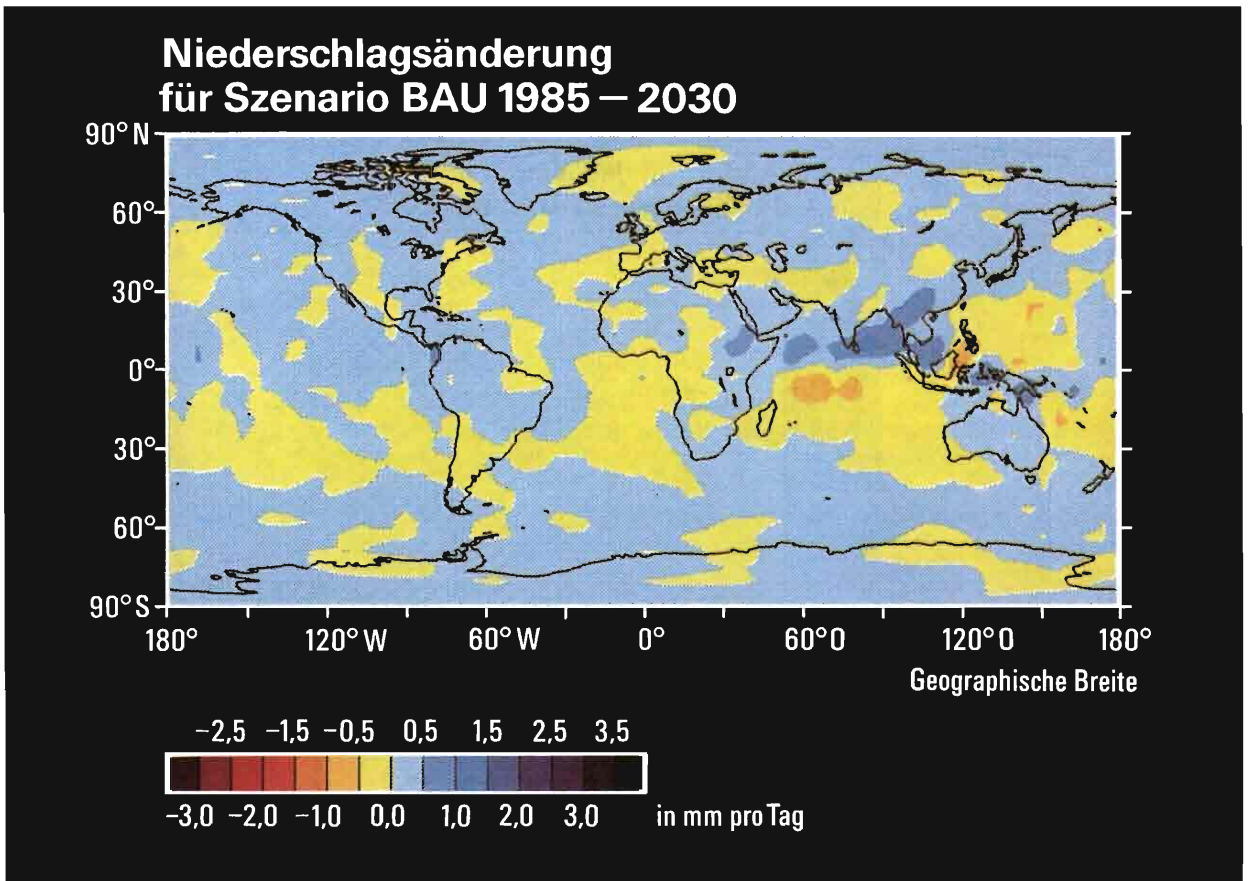


Abb. 30: Regionale Verteilung der Niederschlagsänderungen (79).  
 Regionale Verteilung der Niederschlagsänderungen in mm pro Tag für die Modellkombination ECHAM/OPYC  
 a. im 4. Jahrzehnt der Kopplung bei Szenario 2 \* CO<sub>2</sub> und



b. im 5. Jahrzehnt nach der Kopplung für das IPCC-Szenario BAU.

## 6. Literaturverzeichnis

1. Enquete-Kommission „Vorsorge zum Schutz der Erdatmosphäre“: Schutz der Erdatmosphäre. Eine Internationale Herausforderung. In: Zur Sache, Themen parlamentarischer Beratung, Deutscher Bundestag, 1988
2. Princeton Protocol on Factors that Contribute to Global Warming. Policy Conference on the Global Environment, Princeton University, Princeton, 1988
3. nach Montrealer Protokoll 1990, vgl. Abschnitt F, 5. Kap., Nr. 1.1.3
4. nach Montrealer Protokoll, 1990, vgl. Abschnitt F, 5. Kap., Nr. 1.1.3
5. vgl. Krause, F.; Bach, W.; Koomey, J.: Energy Policy in the Greenhouse, Band Nr. 1, Int. Project for Sustainable Energy Paths, El Cerrito, Kalifornien, USA, 1989 und Marland, G. u. a.: Estimates of CO<sub>2</sub> emissions from fossil fuel burning and cement manufacturing based on UN energy statistics and the U.S. Bureau of Mines cement manufacturing data. ORNL/CDIAC-25 NPD-030, Oak Ridge Nat. Lab., Oak Ridge, USA, 1989
6. Marland u. a., 1989
7. UNEP/WMO: Policymakers Summary of the Scientific Assessments of Climate Change. Rpt. to IPCC from Working Group 1, Bracknell, Großbritannien, 1990
8. Brühl, C.; Hennig, R.: Analyse und Bewertung der Modellsysteme zur Vorhersage von Veränderungen des Ozongehalts der Atmosphäre. Zwischenbericht FE-Vorhaben 104 02 521, Umweltbundesamt, Berlin/Mainz, 1989
9. Brühl, C.; Crutzen, P.J.: Ozone and climate changes in the light of the Montreal protocol, a model study. Eingereicht bei Ambio, 1990
10. M. Mc Farland Dupont Company, persönliche Mitteilung
11. Brühl und Crutzen, 1990
12. Kavanaugh, M.: Estimates of future CO, N<sub>2</sub>O and NO<sub>x</sub> emissions from energy combustion, Atmos. Environment Band 21, 1987, S. 463 — 468
13. vgl. Brühl, C.; Crutzen, P.J.: On the disproportionate role of tropospheric ozone as a filter against solar UV-B radiation. Geophys. Res. Lett. Band 16, 1989, S. 703 — 706
14. Oeschger, H. u. a.: A box diffusion model to study the carbon dioxide exchange in nature. Tellus Band 27, 1975, S. 168 — 192
15. Bach, W.; Jung, H.-J.: Untersuchung der Beeinflussung des Klimas durch Spurengase mit Hilfe von Modellrechnungen. Münstersche Geogr. Arbeiten, Heft 26, 1987, S. 45 -64
16. Bach, W.: Der anthropogen gestörte Kohlenstoffkreislauf: Methoden zur Abschätzung der CO<sub>2</sub>-Entwicklung in der Vergangenheit und in der Zukunft. Düsseldorf Geobotan. Kolloquien Heft 2, 1985, S. 3 — 23
17. Harvey, L. D. D.: Effect of model structure on the response of terrestrial biosphere model to CO<sub>2</sub> and temperature increases. Global Biochem. Cycles 3 Band (2), 1989a, S. 137 — 153
18. Harvey, 1989 a
19. Solomon, A. M.: Transient response of forests to CO<sub>2</sub>-induced climatic change: Simulation modeling experiments in eastern North America. Oecologia Heft 68, 1986, S. 567 — 579
20. Rotmans, J.; Eggink, E.: Methane as a greenhouse gas: A simulation model of the atmospheric chemistry of the CH<sub>4</sub>-CO-OH cycle. Bericht Nr. 758471002 RIVM, Bilthoven, 1988
21. UNEP/WMO, 1990
22. Rotmans, J.,; Swart R. S.; Vrieze, O. J.: The role of the CH<sub>4</sub>-CO-OH cycle in the greenhouse problem. The Science of the Total Environment, Heft 94, 1990, S. 233 — 252



23. Mintzer, I. M.: A matter of degree. The potential for controlling the greenhouse effect. Bericht Nr. 5, World Resources Institute, Washington, D.C., 1987
24. Bach, W.; Jain, A. K.: CFC greenhouse potential of scenarios possible under the Montreal Protocol. Int. J. of Climatology Band 10, 1990, S. 439 – 450
25. Ramanathan, V. u. a.: Climate-chemical interactions and effects of changing atmospheric trace gases. Revs. Geophys. Band 25 (7), 1987, S. 1441 – 1482
26. Dickinson, R. E.; Cicerone, R. J.: Future global warming from atmospheric trace gases. Nature Band 319, 1986, S. 109 – 115
27. Harvey, L. D. D.: Managing atmospheric CO<sub>2</sub>. Climatic Change Band 15, 1989b, S. 343 – 381
28. Wigley, T. M. L.: Relative contributions of different trace gases to the greenhouse effect. Climate Monitor Band 16 (1), 1987, S. 14 – 28
29. Hansen, J. u. a.: Global climate changes as forecast by Goddard Institute for Space Studies three-dimensional model. J. Geophys. Res. Band 93, 1988, S. 9341 – 9364
30. Wuebbles, D. J. u. a.: The role of atmospheric chemistry in climate change. J. Air Poll. Control Assoc. Band 39, 1989, S. 22 – 28
31. Fisher, D. A. u. a.: Model calculations of the relative effects of CFCs and their replacements on global warming. Natures Band 344, 1990, S. 513 – 516
32. Ramanathan, V. u. a.: Trace gas trends and their potential in climate change. J. Geophys. Res. Band 90, 1985, S. 5547 – 5566
33. Tricot, D.; Berger, A.: Modelling the equilibrium and transient responses of global temperature to past and future trace gas concentrations. Climate Dynamics Band 2, 1987, S. 39 – 61
34. Harvey, L. D. D.; Schneider, S.H.: Transient climate response to external forcing on 10<sup>0</sup>-10<sup>4</sup> year time scales, Part 1: Experiment with globally averaged coupled atmosphere and ocean energy balance models. J. Geophys. Res. Band 90, D 1, 1985, S. 2191 – 2205
35. UNEP/WMO, 1990
36. Hoffert, M. I.: The role of deep sea heat storage in the secular response to climatic forcing. J. Geophys. Res. Band 85, 1980, S. 6667 – 6679
37. Wigley, 1987
38. Keeling, C. U.; Schönwiese, C. D., 1989, persönliche Mitteilung
39. Berechnungen des Münsterschen Modells für die Enquete-Kommission
40. World Resources Institute: World Resources 1988-89, Basic Books, Inc., New York, 1988
41. Berechnungen des Münsterschen Modells für die Enquete-Kommission
42. Jones, P. D.; Wigley, T.M.L.; Wright, P.B. Global temperature variations between 1861 and 1984. Nature Band 332, 1986, S. 430 – 434  
Jones, P. D.: The influence of ENSO on global temperature. Climate Monitor Band 17 (3), 1988, S. 80 – 89.
43. Schönwiese, C. D., 1990, persönliche Mitteilung
44. Berechnungen des Münsterschen Klimamodells und des Regressionsmodells von Schönwiese, Temperaturdaten nach Jones, 1988
45. Simmons, A.J. u. a.: The ECMWF medium-range prediction model – development of the numerical formulations and the impact of increased resolution. Meteorol. and Atmos. Phys. Band 40, 1989, S. 28 – 60
46. Roeckner, E. u. a.: The Hamburg version of the ECMWF model (ECHAM). In: Boer, G.J. (Hrsg.): Research Activities in Atmospheric and Oceanic Modelling. SAS (JSC Working Group on Numerical Experimentation, WMO/TD-Nr. 332, 1989, S. 7.1 – 7.4
47. Hense, A.; Kerschgens, M.; Raschke, E.: An economical method of computing the radiative transfer in circulation models. Quart. J. Roy. Met. Soc. Band 107, 1982, S. 231 – 252  
Roeckel, B.; Zhao, B.; Raschke, E.: A flexible radiative transfer routine for GCM's: Infrared part. In: Boer, G. J. (Hrsg.): Research Activities in Atmospheric and Oceanic Modelling. CAS/JSC Working Group on Numerical Experimentation, Report Nr. 9, WMO/TD Nr. 141, 1986, S. 4.62 – 4.65
48. Roeckner, E.; Schlese, U.; Biercamp, J.; Löwe, P.: Cloud optical depth feedbacks in climate modelling. Nature Band 329, 1987, S. 138 – 140
49. Louis, J.-F.: A parametric model of vertical eddy fluxes in the atmosphere. Boundary-Layer Meteorol. Band 17, 1979, S. 187 – 202
50. Maier-Reimer, E.; Hasselmann, K.: Transport and storage of CO<sub>2</sub> in the ocean – an inorganic ocean-circulation carbon cycle model. Climate Dyn. Band 2, 1987
51. Oberhuber, J.: An isopycnic global ocean model. Max-Planck-Institut für Meteorologie, Hamburg, 1990, im Druck
52. Hibler, W.D.: A dynamic-thermodynamic sea ice model. J. Phys. Ocean. Band 9, 1979, S. 815 – 846
53. Sausen, R.; Barthel, K.; Hasselmann, K.: Coupled ocean-atmosphere models with flux correction. Climate Dyn., Band 2, 1988, S. 145 – 163
54. Levitus, S.: Climatological Atlas of the World Ocean. NOAA Professional Paper, Band 13, Rockville, Madison, USA, 1982
55. nach Hoffert u. a., 1980
56. entwickelt von Harvey und Schneider, 1985
57. Harvey und Schneider, 1985
58. Berechnungen des Münsterschen Modells für die Enquete-Kommission
59. Berechnungen des Münsterschen Modells für die Enquete-Kommission
60. Enquete-Kommission „Vorsorge zum Schutz der Erdatmosphäre“: Schutz der tropischen Wälder. Eine internationale Schwerpunktaufgabe. In: Zur Sache, Themen parlamentarischer Beratung, Deutscher Bundestag, 1990
61. Berechnungen des Münsterschen Modells für die Enquete-Kommission
62. Berechnungen des Münsterschen Modells für die Enquete-Kommission
63. Berechnungen des Münsterschen Modells für die Enquete-Kommission
64. Berechnungen des Münsterschen Modells für die Enquete-Kommission
65. Berechnungen des Münsterschen Modells für die Enquete-Kommission
66. Berechnungen des Münsterschen Modells für die Enquete-Kommission
67. Berechnungen des Münsterschen Modells für die Enquete-Kommission
68. Berechnungen des Münsterschen Modells für die Enquete-Kommission

69. Berechnungen des Münsterschen Modells für die Enquete-Kommission
70. Schlesinger, M. E.; Equilibrium and transient climatic warming induced by increased atmospheric CO<sub>2</sub>. Climate Dynamics Band 1, 1986, S. 35 — 51
71. Berechnungen des Münsterschen Modells für die Enquete-Kommission
72. Berechnungen des Münsterschen Modells für die Enquete-Kommission
73. Enquete-Kommission „Vorsorge zum Schutz der Erdatmosphäre“, 1990
74. Berechnungen des Mainzer Modells für die Enquete-Kommission
75. Berechnungen des Hamburger Modells
76. Berechnungen des Hamburger Modells
77. Berechnungen des Hamburger Modells
78. Berechnungen des Hamburger Modells
79. Berechnungen des Hamburger Modells

## 7. Tabellenverzeichnis

- Tab. 1: Übersicht über die Szenarien der Enquete-Kommission zur FCKW-Reduktion
- Tab. 2: Übersicht über die Szenarien der Enquete-Kommission zur FCKW und CO<sub>2</sub>-Reduktion
- Tab. 3: Reduktionsplan für FCKW- und Halone-Vereinbarungen mit Ausnahmeregelungen
- Tab. 4: Reduktionsplan für FCKW- und Halone-Vereinbarungen ohne Ausnahmeregelungen
- Tab. 5: Die Auswirkungen von Maßnahmen auf die globalen Emissions- und Konzentrationsänderungen von FCKW und H- FCKW 22
- Tab. 6: Mittlere globale Erwärmung durch die zunehmende Konzentration von FCKW und H-FCKW 22 für verschiedene Szenarien
- Tab. 7: Die Auswirkungen von Maßnahmen auf Änderungen der globalen CO<sub>2</sub>-Emissionen und der Konzentration
- Tab. 8: Die Abhängigkeit der mittleren globalen Erwärmung von unterschiedlichen Emissionszielen
- Tab. 9: Die Wirksamkeit der von der Enquete-Kommission empfohlenen Maßnahmen zur CO<sub>2</sub>-Reduktion
- Tab. 10: Emissionsänderungen und die daraus resultierenden Konzentrationsänderungen für CH<sub>4</sub> und N<sub>2</sub>O
- Tab. 11: Die Abhängigkeit der mittleren globalen Erwärmung von unterschiedlichen Emissionszielen

## 8. Abbildungsverzeichnis

- Abb. 1: Globale FCKW-Produktion nach dem Montrealer Protokoll, 1990
- Abb. 2: Globale H-FCKW 22-Produktion nach Vorschlägen von Washington
- Abb. 3: FCKW-Produktion nach dem Montrealer Protokoll, 1990
- Abb. 4: CO<sub>2</sub>-Emissionen fossiler Brennstoffe in den EK-Szenarien A und D
- Abb. 5: CO<sub>2</sub>-Emissionen durch die Tropenwald-Vernichtung bzw. Rettung in den EK-Szenarien A und C
- Abb. 6: Globale CH<sub>4</sub>- und N<sub>2</sub>O-Emissionen der EK-Szenarien A, B, C und D

- Abb. 7: Energiebedingte CO<sub>2</sub>-Emissionen nach Ländern, kumuliert von 1950 bis 1986
- Abb. 8: Zuordnung der CO<sub>2</sub>-Emissionen nach Ländergruppen für das EK-Szenario D
- Abb. 9: Klimamodell-Konzeption zur Bestimmung der Erwärmungsobergrenze im Hinblick auf die Eindämmung des zusätzlichen Treibhauseffektes
- Abb. 10: Vergleich von beobachteten und aus Emissionen berechneten atmosphärischen CO<sub>2</sub>-Konzentrationen 1959 — 1985
- Abb. 11: Vergleich von beobachteten und aus Emissionen berechneten globalen atmosphärischen FCKW-Konzentrationen von 1975 — 1987
- Abb. 12: Beobachtete und berechnete globale Oberflächentemperatur
- Abb. 13: Jahresmittel der Lufttemperatur im 850 hpa-Niveau  
a. Analyse  
b. Modellsimulation
- Abb. 14: Jahresmittel der Meeresoberflächentemperatur  
a. Beobachtete Klimatologie  
b. Modellsimulation mit dem ECHAM/LSG-Modell  
c. Modellsimulation mit dem ECHAM/OPYC-Modell
- Abb. 15: Vergleich der mittleren globalen Temperaturänderungen in unterschiedlichen Klimamodellen für die IPCC-Szenarien
- Abb. 16: Mittlere globale transiente Temperaturänderungen
- Abb. 17: Die Wirksamkeit des von der Enquete-Kommission empfohlenen Tropenwald-Rettungsplans zur Reduktion  
a. der CO<sub>2</sub>-Emissionen  
b. der CO<sub>2</sub>-Konzentration  
c. der mittleren globalen Oberflächentemperatur
- Abb. 18: Die Wirksamkeit der von der Enquete-Kommission empfohlenen energiebedingten Emissionsziele zur Reduktion  
a. der CO<sub>2</sub>-Emissionen  
b. der CO<sub>2</sub>-Konzentration  
c. der mittleren globalen Oberflächentemperatur
- Abb. 19: Temperaturanstieg und Rate der Erwärmung für die EK- Szenarien A und D
- Abb. 20: Die relativen Anteile der einzelnen Spurengase am zusätzlichen Treibhauseffekt für das EK-Szenario A
- Abb. 21: Die relativen Anteile der einzelnen Spurengase am zusätzlichen Treibhauseffekt für das EK-Szenario D
- Abb. 22: Die beobachtbare und die vorprogrammierte Erwärmung für die EK-Szenarien A und D
- Abb. 23: Langzeit-Erwärmung nach einem vollständigen Emissionsstopp aller Treibhausgase im Jahre 2100 für die EK-Szenarien A und D
- Abb. 24: Die Wirksamkeit der von der Enquete-Kommission empfohlenen Maßnahmen zur Eindämmung des zusätzlichen Treibhauseffektes
- Abb. 25: Zunahme der globalen Mitteltemperatur für 6 Szenarien
- Abb. 26: Erwärmung nach den Szenarien 2 x CO<sub>2</sub> sowie IPCC-BAU und Dr a. für das Modell ECHAM/OPYC und b. ECHAM/LSG
- Abb. 27: Breitenabhängigkeit der Erwärmung
- Abb. 28: Regionale Verteilung der Erwärmung
- Abb. 29: Änderungen des Niederschlags nach den Szenarien 2 x CO<sub>2</sub> und IPCC-BAU
- Abb. 30: Regionale Verteilung der Niederschläge

## 5. KAPITEL

### Klimaforschung und Forschungsbedarf

Die Aussagen der Wissenschaftler über die Bedrohung durch den Treibhauseffekt werden zwar immer sicherer, trotzdem bestehen noch erhebliche Wissenslücken, die gefüllt werden müssen, wenn quantitative und zuverlässige Aussagen über den Umfang und die Auswirkungen der Klimaänderungen gemacht werden sollen. Bereits auf der ersten Weltklimakonferenz im Jahre 1979 wurde das Weltklimaprogramm der Weltorganisation für Meteorologie (WMO) und des International Council of Scientific Unions (ICSU) definiert, in das das Klimaforschungsprogramm der Bundesregierung aus dem Jahre 1982 eingebettet ist.

Grundlegende Fragestellungen von globaler Bedeutung auf dem Gebiet der Klimaforschung sind in der Zwischenzeit durch die Wissenschaft festgelegt worden und werden zur Zeit in internationalen Großprojekten wie beispielsweise dem „Tropical Ocean und Global Atmosphere Program (TOGA)“, dem „World Ocean Circulation Experiment (WOCE)“ und dem „Global Energy and Water Cycle Experiment (GEWEX)“ im Rahmen des Weltklimaforschungsprogramms erforscht. Zu diesem Programm trägt die Bundesrepublik Deutschland durch nationale Verbundvorhaben auf dem Gebiet der Atmosphären- und Meeresforschung bei.

Einen Beitrag zur Klimaforschung leistet auch das durch die Vereinten Nationen (UN) initiierte und im Rahmen von ICSU koordinierte Programm „International Geosphere Biosphere Program“ (IGBP). In diesem Vorhaben soll die Wechselwirkung zwischen der Biosphäre und der Atmosphäre erforscht werden, die einen erheblichen Einfluß auf die chemische Zusammensetzung der Atmosphäre hat. Darüberhinaus haben WMO und UNEP den „Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC)“ ins Leben gerufen, der den derzeitigen Wissensstand über die mögliche Klimaänderung und deren Auswirkung, unter anderem auch auf die gesellschaftspolitische Entwicklung im globalen und regionalen Maßstab zusammentragen und fortschreiben soll. Eine weitere Aufgabe dieses Ausschusses ist die Ausarbeitung geeigneter Strategien zur Bewältigung der Auswirkungen und Vermeidung von Klimaänderungen. An diesem Ausschuß ist die Bundesrepublik Deutschland durch die Mitarbeit von Experten beteiligt.

Auf EG-Ebene wurde im vergangenen Jahr das europäische Klimaforschungsprogramm „Climate and Natural Hazard (EPOCH)“ definiert, das am 1. August 1990 angelaufen ist. Das im Rahmen dieses Programms durchgeführte Projekt „Climate of the 21st Century“ wird von der Bundesrepublik Deutschland koordiniert. Dieses europäische Vorhaben wird durch nationale Vorhaben in verschiedenen europäischen Ländern ergänzt. An dieser Stelle wird das „Hadley

Centrum“ in Großbritannien genannt, das sich ausschließlich der Klimaforschung widmet und in diesem Jahr eröffnet wurde.

In Anbetracht des Umfangs der erwarteten sozioökonomischen Auswirkungen einer Klimaänderung sind innerhalb der Bundesrepublik Deutschland auch auf Länderebene Klimaforschungsprogramme entwickelt worden, in denen regionale, länderspezifische Fragestellungen erarbeitet werden.

#### 1. Die Klimaforschung in der Bundesrepublik Deutschland

Die Möglichkeit einer anthropogen bedingten Klimaänderung und die daraus resultierenden Auswirkungen sind in der Bundesrepublik Deutschland bereits frühzeitig erkannt worden. Verschiedene, auf dem Gebiet der Klimaforschung tätige Arbeitsgruppen sind seit den siebziger Jahren gefördert worden. Diese Aktivitäten wurden im Jahre 1982 in das von der Bundesregierung verabschiedete nationale Klimaforschungsprogramm integriert und in Form eines Verbundprojekts weitergeführt.

Den Empfehlungen der Wissenschaft folgend konzentrierten sich diese Aktivitäten vor allem auf Fragen der Grundlagenforschung, wobei die Schwerpunkte auf folgenden Themenkreisen lagen:

- Globale Klimamodelle und Klimadiagnostik,
- Simulation des mesoskaligen Klimas mit numerischen Modellen,
- Strahlung und Wolken in Klima- und Zirkulationsmodellen,
- Landoberflächenklimatologie,
- Auswirkungen der Kryosphäre auf das Klima der Erde und
- terrestrische und marine Paläoklimatologie.

Dieses Programm ist in der Zwischenzeit mehrfach fortgeschrieben worden. Aufgrund der erzielten Ergebnisse und in Anbetracht neuer Fragestellungen hat sich die Zielsetzung des Klimaforschungsprogramms von einer breit angelegten Grundlagenforschung zu einer problemorientierten Vorsorgeforschung entwickelt.

Dieser Trend hat sich durch die Einrichtung des BMFT-Förderschwerpunkts „Treibhauseffekt“ verstärkt, in dem

- Vorhersagen zukünftiger globaler Klimaänderungen ermöglicht,

- Prognosen der zeitlichen Entwicklung und der räumlichen Verteilung wichtiger Klimaparameter im regionalen Maßstab erstellt,
- das anthropogene Klimasignal identifiziert und
- das Verständnis der Spurenstoffkreisläufe sowie des hydrologischen Zyklus' verbessert

werden sollen.

Im Rahmen dieser Förderkonzeption sind Analysen langer Datenreihen und Langzeitmessungen, Intensiv-Meßphasen für Prozeßstudien sowie die Weiterentwicklung von Modellen, insbesondere auf regionalem Sektor, und die Validierung von Modellergebnissen vorgesehen.

Ein weiteres, die Klimaforschung unterstützendes Förderprogramm ist der durch den BMFT im Jahre 1986 etablierte Förderschwerpunkt „Physikalisch-chemische Prozesse in der Atmosphäre“, der schwerpunktmäßig die Erforschung der chemischen Umwandlung anthropogen emittierter Schadstoffe, Studien zur Bildung sekundärer Schadstoffe durch homogene und heterogene chemische Reaktionen sowie Untersuchungen des Transports beziehungsweise der Ausbreitung der primär emittierten und sekundär gebildeten Schadstoffe in der Troposphäre umfaßt. Diese Aktivitäten sind seit 1988 in dem auf europäischer Ebene koordinierten und in der EUREKA-Initiative integrierten Verbundprojekt EUROTRAC (European Experiment on Transport and Transformation of Environmentally Relevant Trace Constituents in the Troposphere over Europe) zusammengefaßt.

Einen Beitrag zur Klimaforschung leistet auch das Ozonforschungsprogramm des BMFT (siehe hierzu auch Kapitel 6 dieses Berichts), in dem das Ausmaß und die Ursachen des Ozonabbaus in der Stratosphäre in mittleren und hohen Breiten der Nordhemisphäre untersucht und die Einwirkung der daraus resultierenden Zunahme der UV-B-Strahlung auf die bestehenden Ökosysteme bestimmt werden sollen.

Die zuvor genannten Förderschwerpunkte sind in dem BMFT-Förderprogramm Klima- und Atmosphärenforschung zusammengefasst und über die Bildung von Verbundprojekten untereinander verknüpft. Ergänzend zu den BMFT-Aktivitäten werden auf Länderebene Fördervorhaben auf dem Gebiet der Klimaforschung (unter anderem in Bayern) gefördert, die sich speziellen regionalen Klimaaspekten zuwenden. Von besonderer Bedeutung ist dabei die Entwicklung regionaler Klimamodelle, mit denen die regionalen Auswirkungen einer globalen Klimaänderung abgeschätzt und daraus Anpassungsstrategien abgeleitet werden können.

Wichtige, die Klimaforschung unterstützende Erkenntnisse sind auch in den durch Bund und Länder geförderten Forschungsvorhaben zur Untersuchung über die Ursachen der in Europa aufgetretenen „Neuartige Waldschäden“ erzielt worden.

## 2. Forschungsbedarf

Trotz erheblicher Forschungsanstrengungen auf dem Gebiet der Klimaforschung bestehen noch große For-

schungslücken, die zur Zeit eine zuverlässige Aussage über die zukünftige Entwicklung der Klimaänderung und deren globalen Auswirkungen nicht in dem gewünschten Umfang und der Genauigkeit zulassen. Der zur Schließung der Forschungslücken erforderliche Forschungsbedarf ist nachstehend zusammengefaßt, wobei die Reihenfolge keine Hinweise auf die Priorität der Forschungsempfehlungen gibt.

Die Bundesregierung wird ersucht, Forschungsaktivitäten auf den Gebieten

1. Verteilung und Trends von direkt und indirekt klimawirksamen Spurenstoffen,
2. Emission und Deposition von klimarelevanten Spurenstoffen,
3. Klimamodellierung und
4. Auswirkung von Klimaänderung (Klimaimpaktforschung)

im Rahmen von Verbundprojekten unverzüglich zu fördern.

### *Ad. 1. Verteilung und Trends*

Die zur Zeit vorliegenden Informationen über die räumliche Verteilung und zeitliche Entwicklung von direkt und indirekt klimawirksamen Spurenstoffen in der Atmosphäre sowie meteorologische Parameter sind unbefriedigend und bedürfen einer wesentlichen Verbesserung. Aktivitäten auf folgenden Teilgebieten werden vorgeschlagen:

- Auswirkung und Nutzung bereits vorliegender Langzeitserien von Klimaparametern und weitere Interpretation paläoklimatischer Klimadaten.
- Langfristige Aussagen der globalen Verteilung und zeitlichen Änderung klimarelevanter Spurenstoffe in der Atmosphäre durch Einsatz von Satelliten und Flugzeugen.
- Bestimmung der zeitlichen Entwicklung der direkt und indirekt klimawirksamen Spurenstoffe in der Troposphäre und Stratosphäre durch Langzeitmessungen an Reinluftstationen mit Einsatz von in-situ Meßverfahren und Fernerkundungsmeßmethoden.
- Bestimmung der zeitlichen Veränderung der Niederschlagsmengen, der Bewölkung und der Vertikalverteilung der Temperatur.
- Erfassung von Daten klimarelevanter Oberflächenparameter, zum Beispiel Art und Verteilung der Vegetation, Bodentemperatur, Bodenfeuchte, und andere.
- Bestimmung der Verteilung, Verweilzeit und chemischen Zusammensetzung der Aerosole und ihr Einfluß unter anderem auf die optischen Eigenschaften von Wolken.
- Verbesserung von Meßmethoden.

### *Ad. 2 Emission und Deposition*

Der Austausch von direkt und indirekt klimawirksamen Spurenstoffen zwischen der Biosphäre und der

Atmosphäre sowie die Emission durch anthropogene Aktivitäten sind nur unzureichend bekannt. Es sind erhebliche Forschungsanstrengungen zu unternehmen, um die Emissions- und Depositionsraten zu quantifizieren und ihre Beeinflussung durch verschiedene, sich zeitlich ändernde Parameter zu untersuchen. Vorgeschlagen werden folgende Forschungsarbeiten:

- Bestimmung des natürlichen Kohlenstoffkreislaufs und seine Beeinflussung unter anderem durch die Rodung von Wäldern und immissionsbedingte Waldschäden.
- Emission klimarelevanter Spurenstoffe durch landwirtschaftliche Aktivitäten, beispielsweise durch Anwendung mineralischer Dünger sowie geänderter Kulturtechniken und Bodenbearbeitung.
- Emission von Spurenstoffen durch Biomasse-Verbrennung und Einfluß auf die Chemie der tropischen Troposphäre.
- Emission von  $\text{CH}_4$  und anderen Spurengasen aus Reisfeldern, Stümpfen, Mülldeponien sowie durch Erdgasnutzung.
- Deposition von direkt und indirekt klimawirksamen Gasen in Abhängigkeit von der Konzentration und Zusammensetzung des Schadstoffgemisches.
- Emission von  $\text{N}_2\text{O}$  aus natürlichen Ökosystemen sowie anthropogenen und anderen Quellen durch Verbrennung fossiler Brennstoffe sowie durch Einsatz von Katalysatoren zur Entstickung von Abgasen aus Kraftfahrzeugen und Kraftwerken.
- Aufnahme von FCKW-Substituten und ihrer Folgeprodukte durch Ökosysteme.
- Einfluß des Flugverkehrs auf die Verteilung und Chemie von Spurenstoffen in sensitiven Höhen.
- Mechanistische Untersuchungen über die zur Bildung und Abbau direkt und indirekt klimawirksamer Spurengase führenden Prozesse und deren Abhängigkeit von bodenphysikalischen Parametern beziehungsweise Klimaparametern.
- Bildung von Aerosolen aus natürlich und anthropogen emittierten Gasen.

### Ad. 3 Klimamodellierung

Die zur Zeit vorhandenen Klimamodelle sind mit erheblichen Unsicherheiten behaftet. Von besonderer Bedeutung ist dabei die Kopplung der einzelnen im Klimasystem wirksamen Komponenten wie zum Beispiel die Biosphäre, die Atmosphäre, die Ozeane, oder die Kryosphäre. Gleichzeitig müssen die in der Atmosphäre ablaufenden chemischen Prozesse berücksichtigt werden, die zum Abbau und/oder zur Produktion klimarelevanter Spurengase beitragen. Ein Schwerpunkt innerhalb dieser Aktivitäten ist die Entwicklung und Einbettung regionaler Klimamodelle in die globalen Modelle. Einen weiteren Schwerpunkt bilden die Szenarienrechnungen, die auf der Grundlage unterschiedlicher plausibler Emissionsszenarien zukünftige Konzentrationen von Treibhausgasen be-

rechnen und die sich daraus ergebenden Klimaentwicklungen ableiten. Der Hauptzweck dieser Analysen ist es, Emissionsreduktionsziele zu definieren und sie bezüglich ihrer Wirksamkeit zur Eindämmung des zusätzlichen Treibhauseffektes für den politischen Entscheidungsprozeß zu bewerten. Die zeitabhängigen Szenarienrechnungen können mit vereinfachten 1-D-Modellen bis hin zu komplexeren 3-D-Modellen durchgeführt werden, wobei es gilt, die Güte der Ergebnisse ständig zu verbessern. Es wird empfohlen:

- Entwicklung zu 3-dimensionalen, gekoppelten Klimamodellen unter Berücksichtigung der chemischen Umwandlung in der Atmosphäre.
- Parameterisierung der Wolken in Klimamodellen mit besonderer Berücksichtigung des Einflusses auf die Strahlung und die Dynamik der Atmosphäre.
- Einbau des Kohlenstoffkreislaufs in das Klimamodell.
- Bessere Nutzung und Interpretation der bisher erzielten Modellergebnisse, zum Beispiel im Hinblick auf extreme Wetterereignisse.
- Validierung der Modellergebnisse durch globale Datensätze.
- Modellgütetests (Vergleich der Modellergebnisse mit den Meßdaten, Vergleich der Modellergebnisse untereinander).
- Tests unterschiedlicher Wirkungsmechanismen (zum Beispiel Einflüsse geophysikalischer und biochemischer Rückkopplungsprozesse).
- Untersuchung der Wirksamkeit weiterführender Maßnahmen zur Eindämmung des Treibhauseffektes im Bereich
  - energiebedingten  $\text{CO}_2$ -Austoßes,
  - biogener  $\text{CO}_2$ -Emissionen,
  - Methan- und Distickstoffoxid-Emissionen,
  - Emission von FCKW-Ersatzstoffen.
- Berechnung plausibler Zuordnungsmodelle und Bewertung für den politischen Entscheidungsprozeß.

### Ad. 4 Auswirkungen einer Klimaänderung (Klimaimpakt)

Nach dem derzeitigen Kenntnisstand ist davon auszugehen, daß sich das Klima aufgrund anthropogener Aktivitäten in der Vergangenheit geändert hat und sich in Zukunft auch weiter verändern wird. Durch die von der Enquete-Kommission in diesem Bericht (vgl. Abschnitt A) vorgeschlagenen Maßnahmen kann eine Klimaänderung lediglich auf ein vertretbares Minimum beschränkt werden. Dies bedeutet, daß mit Auswirkungen durch diese Klimaänderung, allerdings mit starken regionalen Unterschieden, zu rechnen ist, für die Anpassungsstrategien entwickelt werden müssen.

Aufgrund dieser Erkenntnis gewinnt die Klimawirkungsforschung zunehmend an Bedeutung, in der ne-

ben den Auswirkungen auf die natürlichen Ökosysteme auch die sozio-ökonomischen Auswirkungen der Klimaänderung auf nationaler und internationaler Ebene beachtet werden müssen. Klimawirkungsforschung kann nur in einem interdisziplinär angelegten Forschungsprogramm unter Einschluß unter anderem von Wirtschaftswissenschaften erfolgreich betrieben werden.

Einige Themen sind nachstehend beispielhaft aufgeführt:

- Auswirkung von Klimaänderungen auf natürliche Ökosysteme und daraus resultierende Folgen bezüglich der Bodenerosion, Wasserqualität, Wasserführung von Flüssen und andere.
- Veränderung der Quell- und Senken-Stärken wichtiger umweltrelevanter Spurenstoffe in repräsentativen Ökosystemen.
- Maßnahmen zur Reduktion der Emission von Schadstoffen durch anthropogene, unter anderem auch landwirtschaftliche Aktivitäten.
- Verlagerung der Klimazonen und deren Auswirkung auf natürliche und landwirtschaftliche Ökosysteme, insbesondere in hohen Breiten.
- Auswirkung der Klimaänderung auf die landwirtschaftliche und forstwirtschaftliche Produktion und deren Rückwirkung auf die Gesamtwirtschaft.
- Effekt erhöhter CO<sub>2</sub>-Konzentration und veränderter Klimabedingungen sowie einer erhöhten Konzentration von Schadstoffen auf die vorhandene Biomasse.
- Einfluß der geänderten Klimaverhältnisse auf die chemische Zusammensetzung der Troposphäre.
- Auswirkungen von Klimaänderungen auf die Wirtschafts- und Sozialpolitik in einzelnen Ländern (zum Beispiel Sozialverträglichkeit und Anpassungsstrategien, Verteilungsfragen).
- Auswirkung von Klimaänderungen auf Fragen der internationalen wirtschaftlichen und politischen Beziehungen (zum Beispiel geopolitische und geostrategische Fragen, Nord-Süd-Verhältnis, internationale Wirtschaftsordnung, Problem der sogenannten „Öko-Flüchtlinge“).

**ABSCHNITT D****Ozonabbau in der Stratosphäre****Einführung**

Die Veränderungen der Ozonschicht in der Stratosphäre während der Monate September/Okttober über der Antarktis gehören zu den gravierendsten Störungen der chemischen Zusammensetzung der Erdatmosphäre, die jemals zuvor beobachtet wurden. Dieses als Ozonloch bekannte Phänomen hat sich seit seinem ersten Auftreten zum Anfang der siebziger Jahre mit einer quasi-zweijährigen Periodizität von Jahr zu Jahr verstärkt. Zur Zeit der maximalen Ausdehnung des Ozonlochs in den bisher extremsten Jahren 1987 und 1989 war deutlich mehr als die Hälfte des Ozons zerstört, gemessen vom Erdboden aus (Ozongesamt säule); die lokalen Verluste in Höhen zwischen 15 und 20 km betragen mehr als 90 Prozent. Die Ursache dieser besorgniserregenden Entwicklung ist die Zunahme der anthropogenen FCKW. In der winterlichen antarktischen Stratosphäre werden chlorhaltige Spurengase wegen der speziellen meteorologischen Bedingungen durch Reaktionen an Eis- und Eis/Salpersäure-Teilchen derart aktiviert, daß im Licht der Frühjahrssonne eine Verstärkung des anthropogen induzierten Ozonabbaus einsetzt.

Die Stratosphäre des Nordpols zeigt während des Winters ähnliche Aktivierungsprozesse und chemische Störungen wie die des Südpols; wegen der anderen meteorologischen Bedingungen ist es aber bisher nicht zu ähnlich starken Ozonverlusten wie bei der Ausbildung eines Ozonlochs gekommen. Es wurden aber während bestimmter Meßkampagnen lokal und zeitlich begrenzte Ozonabnahmen beobachtet. Die Mechanismen dieser Ozonänderungen sind nicht

vollständig geklärt; vermutlich spielt aber die Dynamik ebenso eine Rolle wie chemische Störungen.

Eine neuere Auswertung von Meßflügen im Jahr 1989 über der Arktis bestätigt das Auftreten großer Gebiete mit um bis zu 17 Prozent reduzierten Ozonwerten. Es wird angenommen, daß diese Abnahme auf chemische Prozesse zurückzuführen ist.

In der globalen Stratosphäre außerhalb der Polarreiche hat die Ozonkonzentration weniger gravierend, aber doch auch merklich abgenommen. Im Breitenband 30 bis 64°N, für das wegen der Verteilung der Meßstationen die meisten und längsten Meßreihen vorliegen und die genaueste Analyse durchgeführt werden konnte, nahm die mittlere Jahreskonzentration des Ozons seit 1970 um etwa zwei Prozent ab. Bei Mittelung über die Wintermonate allein waren die Verluste aber erheblich stärker und betragen bis zu 5,4 Prozent bei 55°N. Es ist nicht auszuschließen, daß die Verluste in höheren Breiten noch größer sind.

In der Südhemisphäre sind die Ozonverluste zusätzlich durch den „Auffüllereffekt“ des Ozonlochs geprägt und deshalb stärker als in der Nordhemisphäre. Sie betragen bis zu 10 Prozent (im Breitenband 53° bis 65°S) allein im Zeitraum 1978 bis 1987.

Die beobachteten Ozonänderungen in der globalen Stratosphäre können nicht durch bekannte natürliche Phänomene erklärt werden. Ähnlich wie in der antarktischen Stratosphäre müssen auch hier die Ozonabnahmen auf die Zunahme der anthropogenen Spurengase, insbesondere FCKW, zurückgeführt werden.

**1. KAPITEL****Aktueller naturwissenschaftlicher Kenntnisstand****1. Ausmaß der beobachteten Veränderungen des Ozons in der Stratosphäre****1.1 Veränderungen in den Polarregionen**

Die Ozonkonzentration in der Stratosphäre ändert sich unter menschlichem Einfluß am stärksten in den Polarregionen. Jedoch sind die Verluste keinesfalls symmetrisch in beiden Polarregionen: die Stratosphäre des Südpols ist als Folge ihrer besonderen meteorologischen Bedingungen am stärksten gestört.

**1.1.1 Ozonloch über der Antarktis**

Das Auftreten des Ozonlochs über der Antarktis gehört zu den gravierendsten Veränderungen des Ozons in der Stratosphäre, die jemals zuvor beobachtet wurden. Dabei wird die Ozonschicht jährlich wiederkehrend in den Monaten September/Oktober drastisch verdünnt. Der Effekt hat sich seit seinem ersten Auftreten Anfang der siebziger Jahre erheblich verstärkt.

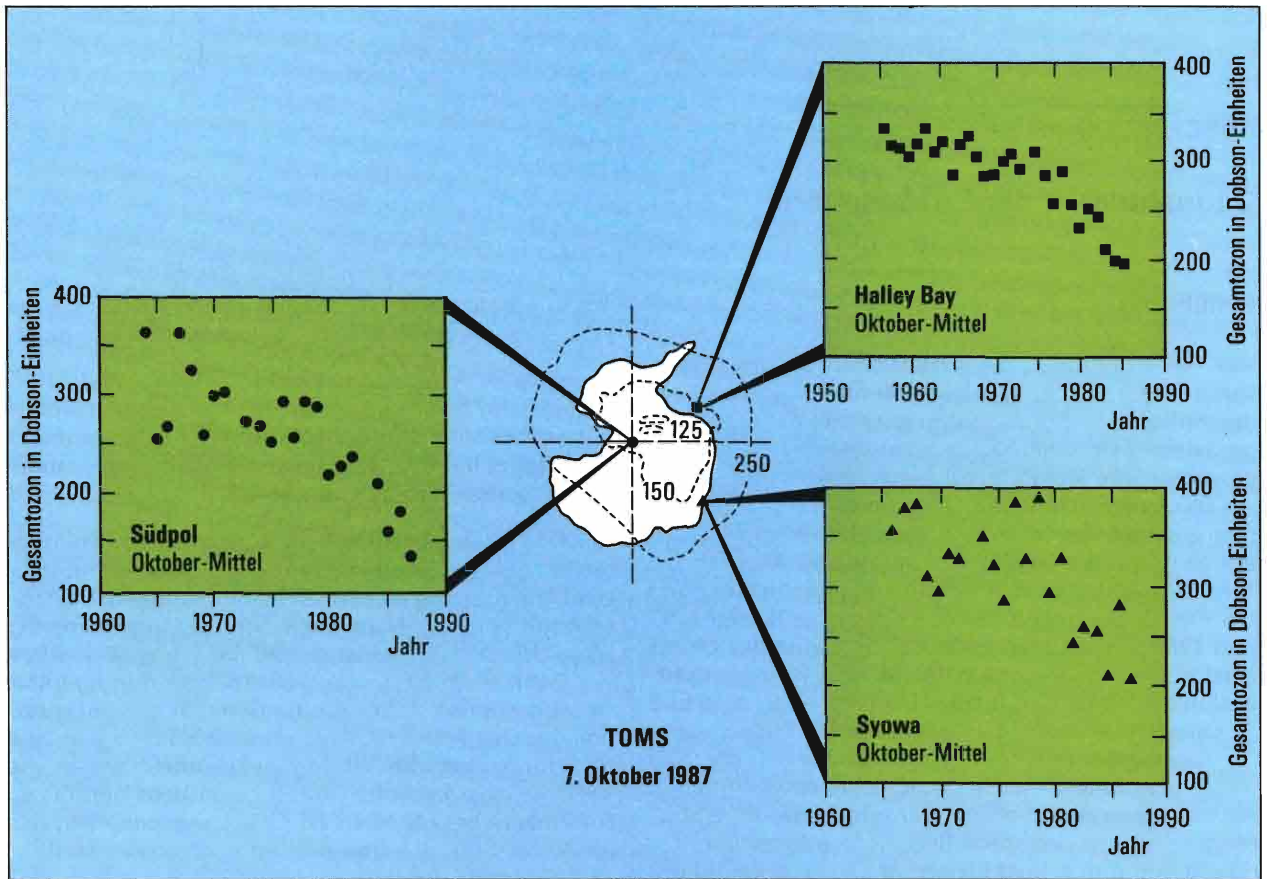


Abb. 1: Beobachtete Trends der Ozon-Gesamtsäulendichte im Monat Oktober an den Antarktisstationen Halley Bay und Syowa sowie am Südpol seit Mitte der fünfziger Jahre (5). Gezeigt sind ebenfalls die TMS-Satellitendaten für den 7. Oktober 1987. Unter Ozon-Gesamtsäulendichte ist die Dicke der Ozonschicht zu verstehen, die sie annehmen würde, wenn man sie auf 1 bar Luftdruck bei 22 Grad Celsius komprimieren würde. Sie wird gemessen in Dobson-Einheiten (Dobson Units; 100 D.U. = 1 mm Schichtdicke).

Das Ozonloch wurde erstmals 1985 in Meßreihen des „British Antarctic Survey“ an der Station Halley Bay entdeckt (1). Bereits ein Jahr früher wurde allerdings über ungewöhnlich niedrige Ozonwerte über der japanischen Antarktisstation Syowa (2) berichtet. Seither ist das Phänomen Ozonloch durch weitere Meßreihen von der Antarktis aus (3) und durch Satellitenbeobachtungen (4) überzeugend bestätigt worden. Abbildung 1 zeigt die beobachteten Veränderungen der Oktobermittelwerte der Ozongesamtsäulendichte über verschiedenen Meßstationen der Antarktis. In allen Fällen ist ein deutlich abnehmender Trend seit Ende der sechziger Jahre zu erkennen.

Nach heutiger Kenntnis betrug der Chlorgehalt der Stratosphäre um 1970 etwa 1,3 ppb (ppb = parts per billion =  $10^{-9}$ ). Er ist durch die starke Zunahme der Emission von FCKW und anderer chlorhaltiger Verbindungen auf etwa 3 ppb im Jahre 1990 angestiegen. Der abnehmende Trend des Oktobermittelwerts des Ozons über der Antarktis seit Ende der siebziger Jahre verläuft in etwa parallel zur Zunahme des Chlorgehalts.

Obwohl sich die Ausbildung des Ozonlochs systematisch seit Ende der sechziger Jahre verstärkt hat, ist

die Entwicklung nicht von Jahr zu Jahr die gleiche. Genauere Analysen, die insbesondere seit der zusätzlichen Verfügbarkeit der Satellitendaten gegen Ende der siebziger Jahre durchgeführt werden, zeigen eine gewisse zweijährige Periodizität mit einer stärkeren Ausprägung des Ozonlochs in ungeraden Jahren. Die Ozonverluste in den Jahren 1987 und 1989 waren bisher die stärksten, die jemals zuvor beobachtet wurden. In der gesamten Ozonsäule über dem Erdboden waren mehr als 50 Prozent des Ozons zerstört. Das Ozonloch 1988 dagegen war vergleichsweise schwach ausgeprägt.

In Abbildung 2 ist das Ausmaß des Ozonlochs über der Antarktis am 3. Oktober 1987 und 1989 dargestellt.

Abbildung 3 zeigt die zeitliche Entwicklung der Oktobermittel-Werte der Ozonsäulendichte über der Station Halley Bay, gemeinsam mit entsprechenden Satellitendaten. Tabelle 1 ist eine Zusammenstellung der Oktoberwerte (Monatsmittel und Monatsminimum) der Meßreihen des „British Antarctic Survey“ über Halley Bay.



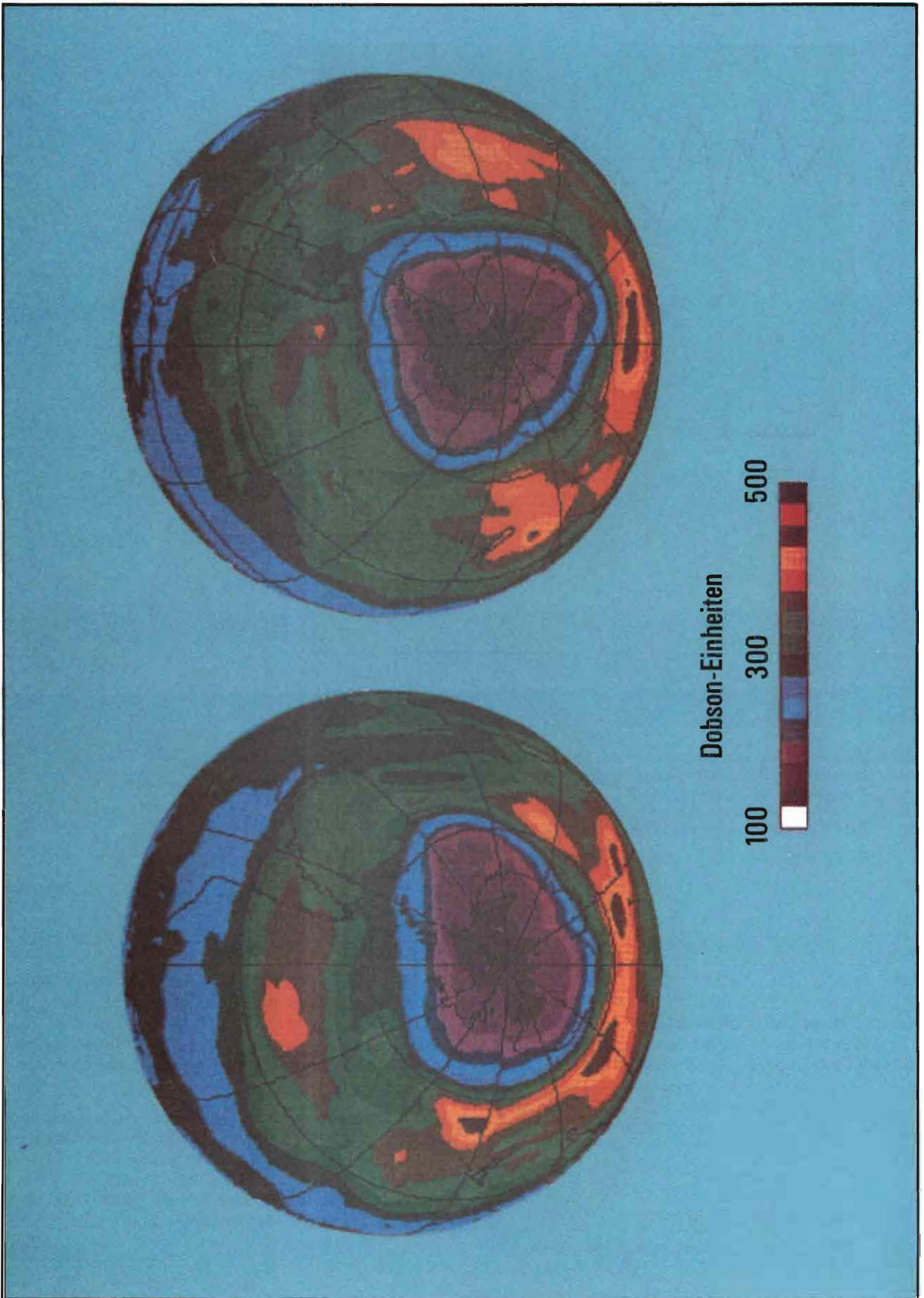


Abb. 2: Satellitenaufnahme des Ozonlochs über der Antarktis am 3. Oktober 1987 und 1989 (6).

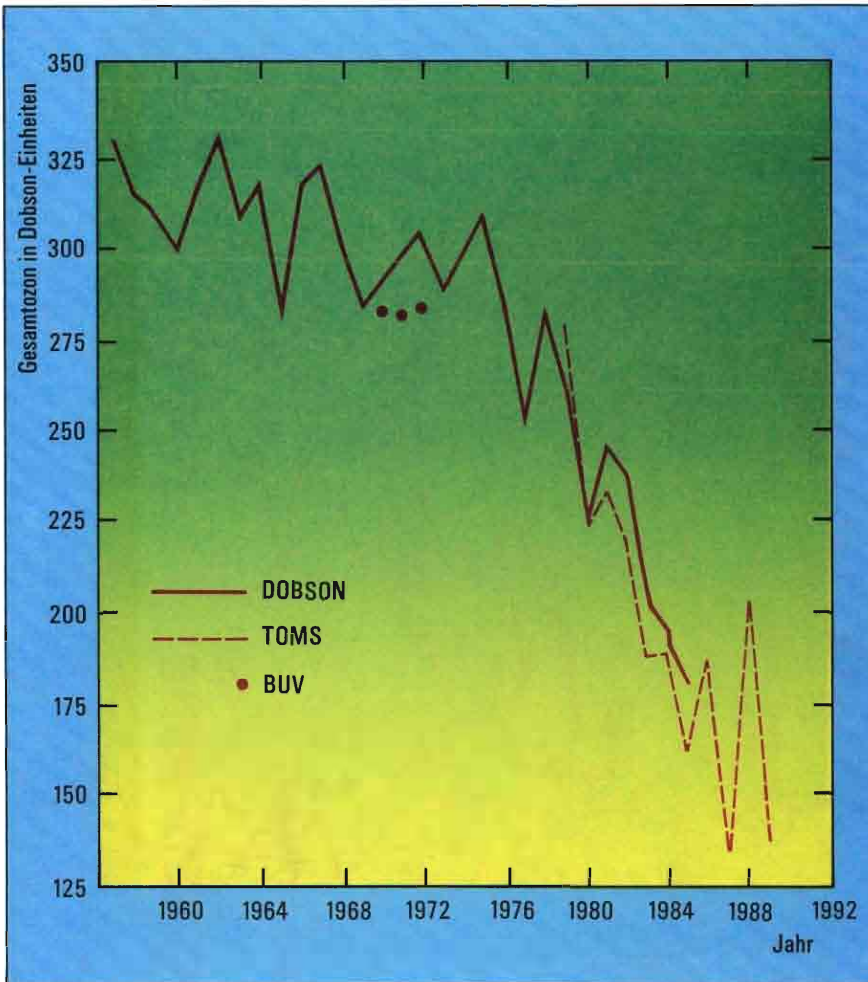


Abb. 3: Zeitliche Entwicklung der Oktobermittel-Werte der Ozonsäulendichte über der Antarktis. Vergleich von Dobson-Messungen an der Station Halley-Bay und Satellitendaten (7).

Dobson = Dobson Spektrometer

TOMS = Total Ozone Mapping Spectrometer

BUV = Backscattered Ultraviolet Instrument

Tabelle 1

**Ozon-Gesamt säulendichten (in Dobson-Einheiten)  
während des Monats Oktober im Zeitraum  
1960 bis 1989 über der Antarktisstation Halley Bay (8)**

Jahr	Monatsmittel	Monatsminimum
1960	301	270
1970	282	242
1980	227	196
1984	201	180
1985	196	159
1986	248	178
1987	163	139
1988	232	199
1989	164	145

Die Ursache der beobachteten Periodizität in der Ausbildung des Ozonlochs ist zur Zeit nicht vollständig geklärt. Sie ist aber vermutlich das Ergebnis einer dynamisch unterschiedlichen Konditionierung der antarktischen Stratosphäre. Zwei Möglichkeiten kommen in Betracht:

- Die Luftmassen der unteren Stratosphäre in hohen Breiten der Südhemisphäre werden nur einmal im Jahr ausgetauscht, wenn der winterliche Polarwirbel von der Antarktis verdrängt wird. Dies kann zwischen Anfang Oktober und Mitte Dezember passieren. Die Zusammensetzung der einströmenden Luftmassen spielt vermutlich eine entscheidende Rolle für die Tiefe des Ozonlochs im folgenden Jahr. Wenn die nachströmende Luft „von oben“ kommt, ist sie reich an Ozon und anorganischen Chlorkomponenten. Dies ist die Voraussetzung für ein tiefes Ozonloch im nächsten Jahr. Wenn dagegen die nachströmende Luft „von der

Seite“ kommt, ist sie mit Luftmassen aus niederen Breiten durchmischt und reich an Halogenkohlenwasserstoffen. Demzufolge ist mit einer geringen Ausbildung des Ozonlochs des nachfolgenden Jahres zu rechnen.

- Die Tiefe des antarktischen Ozonlochs ist mit der quasi-zweijährigen Schwankung (Quasi-Biannual Oszillation: vgl. Nr. 2.4.1) korreliert (9). Dies ist vermutlich ein gemeinsamer Effekt von Temperatur und Transport. Es wurde gezeigt, daß die minimalen Temperaturen im winterlichen Südpolarwirbel zwischen 5 und 8° Celsius niedriger sind, wenn sich die QBO in der Westphase befindet (10). Deshalb sind temperaturabhängige Verlustpro-

zesse des Ozons besonders ausgeprägt. Dies war in den Jahren 1985 und 1987 der Fall.

Der zeitliche Verlauf der mittleren Ozon-Gesamtsäulendichte über der Südpolarregion in den Monaten August bis Oktober beziehungsweise November während eines Jahres ist in Abbildung 4 gezeigt. Aus ihr läßt sich die Geschwindigkeit der Entstehung des Ozonlochs und seiner Wiederauffüllung entnehmen. Die Ausbildung des Ozonlochs dauert etwa einen Monat. Sie beginnt Anfang September mit dem Erscheinen der Frühjahrs Sonne und erreicht zwischen Ende September und Ende Oktober ihren Tiefpunkt. Die „Erholung“ der Ozonschicht erfolgte im Jahr 1989 ab Mitte Oktober, während sie 1987 erst gegen Ende

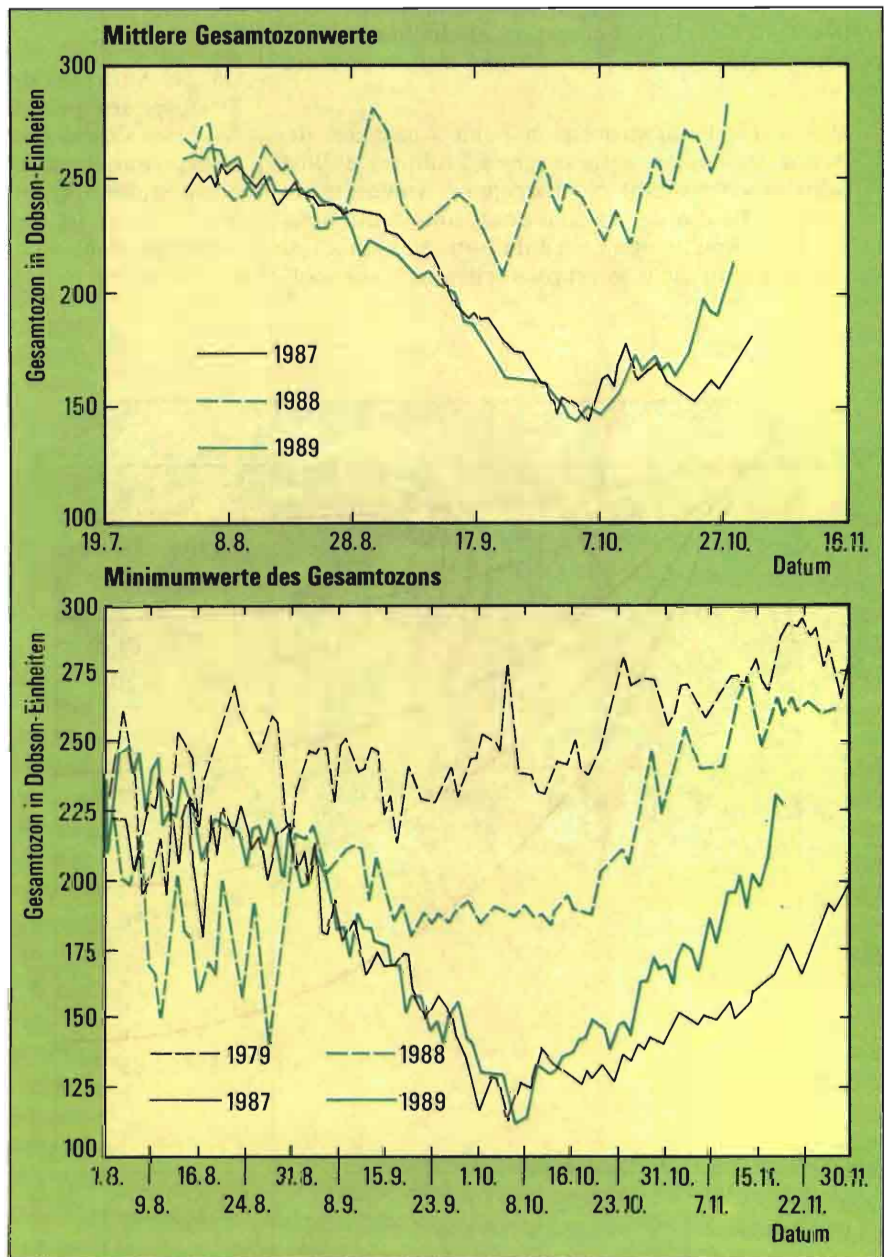


Abb. 4: Zeitlicher Verlauf der mittleren Ozongesamtsäulendichte zwischen 70 und 90° S während der Monate August bis Oktober in den Jahren 1987 bis 1989 (a) (11) und (b) entsprechender Verlauf der niedrigsten Ozongesamtsäulendichte, die südlich von 30°S beobachtet wurde (12).

Oktober einsetzte. Der Prozeß der Erholung und die Geschwindigkeit, mit der die Ozonnormalwerte wieder hergestellt werden, scheint sowohl von der Tiefe des Ozonlochs selbst als auch von der großräumigen Dynamik bestimmt zu sein. Beide gemeinsam bestimmen, wie sich der Polarwirbel aufheizt und aus dem Polargebiet verdrängt wird. In Abbildung 4 b ist der Verlauf des Minimums aller Messungen der Ozongesamtsäulendichten südlich von 30° S aufgetragen. Sie zeigt nochmals die extrem starke Ausbildung des Ozonlochs in den Jahren 1987 und 1989. Die Abbildung zeigt auch eine starke Schwankung der Minimalwerte vor dem Auftreten des Ozonlochs sowie im gesamten Beobachtungszeitraum des Jahres 1979, in dem die südpolare Stratosphäre noch nicht merklich gestört war.

Das Ozonloch beeinflusst die Ozonkonzentration in weiten Teilen der Südhemisphäre, auch über die Südpolarregion hinaus. Die Auswirkungen sind von zweifacher Art:

- Wenn der Polarwirbel sich beim Aufgehen der Sonne im späten antarktischen Frühjahr auflöst, wird ozonarme Luft zu niedrigeren Breiten transportiert. Da die Verweilzeit des Ozons in der unteren Stratosphäre etwa ein Jahr beträgt, kann diese Verdünnung nicht sofort photochemisch ausgegli-

chen werden. Die Folge ist eine Ozonabnahme auch in niederen Breiten. Zweidimensionale Modellrechnungen (2-D-Modelle) sagen Auswirkungen bis in tropischen Breiten voraus (vgl. Abb. 5).

- Der Gesamtverlust an Ozon während des antarktischen Frühjahrs könnte besonders stark sein, wenn die Luft im Polarwirbel nicht nur stagnieren, sondern zusätzlich auch durchströmt würde, so daß ständig ozonarme Luft aus dem chemisch gestörten Zentrum des Polarwirbels in niedrigere Breiten verfrachtet würde.

Welcher von beiden Mechanismen dominiert, läßt sich zur Zeit nur vermuten. Es scheint aber sicher zu sein, daß die starke Ozonabnahme in der Südhemisphäre südlich von 60° S um etwa 10 Prozent im Jahresmittel seit 1987 eine Auswirkung des antarktischen Ozonlochs ist.

Da das Auftreten des Ozonlochs mit dem Gehalt der Stratosphäre an anthropogenem Chlor verknüpft ist, wird das Ozonloch noch viele Jahrzehnte auftreten, selbst wenn drastische Maßnahmen der FCKW-Emissionsregulierung ergriffen werden. Eine entscheidende Frage ist deshalb unter anderem, ob und in welchem Maße sich das Ozonloch in die Fläche und die Höhe ausweiten kann. Diese Frage ist zur Zeit

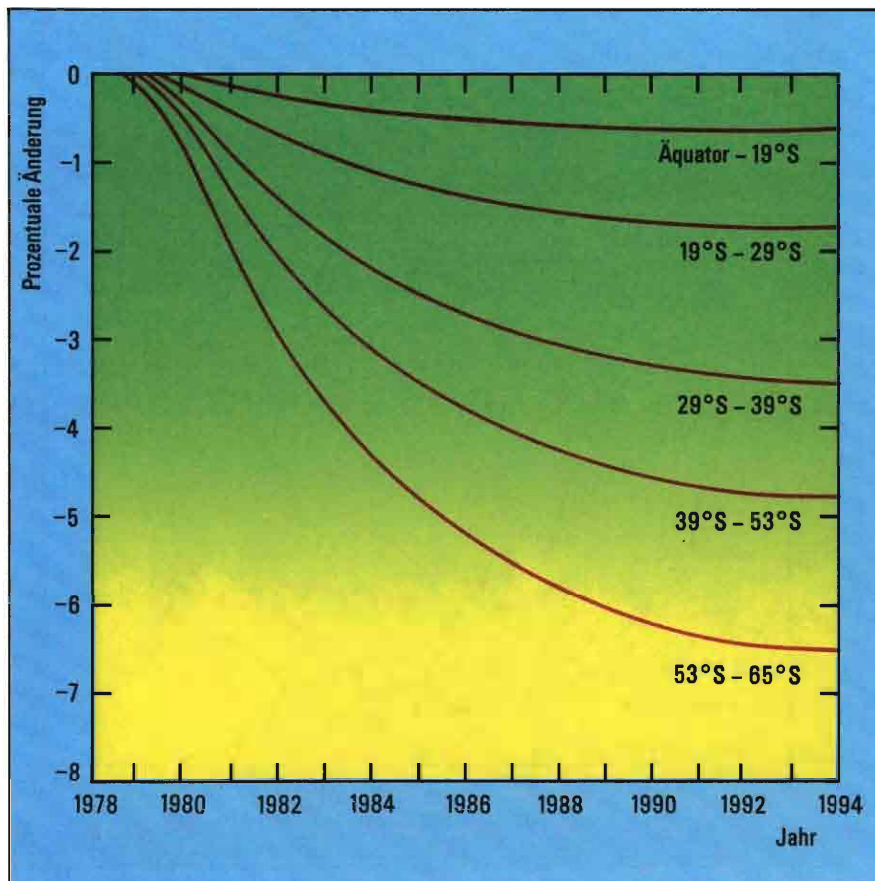


Abb. 5: Berechnete prozentuale Änderungen der Jahresmittelwerte der Ozongesamtsäule in verschiedenen Breitenbändern der Südhemisphäre im Zeitraum 1979 bis 1994 („Verdünnungseffekt“: 2-D-Modellrechnung; (13)).

nicht mit Sicherheit zu beantworten. Nach gegenwärtigem Verständnis ist die Ursache der Ausbildung des antarktischen Ozonlochs das Zusammentreffen von hohen ClX- und niedrigen NO<sub>y</sub>-Konzentrationen (vgl. Nr. 3.2). Beide haben sowohl chemische als auch meteorologische Ursachen. Das Hauptquellgebiet von anorganischen Chlorverbindungen (HCl, ClO, ClONO<sub>2</sub> und anderen) aus FCKW ist die mittlere Stratosphäre in niedrigen geographischen Breiten. Der Gehalt an ClX in der antarktischen Stratosphäre ist deshalb auch vom Transport der stratosphärischen Luftmassen von niedrigeren und gemäßigten Breiten in die Polarregion und damit von der allgemeinen atmosphärischen Zirkulation abhängig. Die NO<sub>y</sub>-Konzentration der antarktischen Stratosphäre wird durch Kondensationsprozesse, heterogene chemische Reaktionen und damit durch die Häufigkeit von polaren Stratosphärenwolken (engl.: polar stratospheric clouds, PSC) bestimmt. Diese wiederum sind das Ergebnis der zeitlichen und räumlichen Ausdehnung der extrem tiefen Stratosphärentemperaturen im Monat August, die ausschließlich großräumige und lokale meteorologische Ursachen haben.

Die Entstehungsbedingungen für das antarktische Ozonloch, nämlich hohes ClX und niedriges NO<sub>y</sub>, limitieren es zur Zeit auf die geographische Region südlich von 65 °S und eine vertikale Ausdehnung in Höhen zwischen 12 und 24 km.

Die geographische Grenze des Ozonlochs ist identisch mit der Region der PSC-Bildung und der begleitenden Denitrifizierung und Dehydratisierung der Stratosphäre. Diese Prozesse laufen wegen der niedrigen Temperaturen am effektivsten innerhalb des Polarwirbels ab. Die PSC-Bildung kann sich aber auch auf niedrigere Breiten ausdehnen, zum Beispiel durch

- Kühlung der Stratosphäre durch eine Zunahme der Treibhausgase, insbesondere Kohlendioxid (CO<sub>2</sub>);
- Zunahme des Wasserdampf-Gehaltes wegen zunehmender Methankonzentrationen (CH<sub>4</sub>) und zunehmenden Flugverkehrs;
- Zunahme des Stickoxidgehaltes (NO<sub>x</sub>) durch wachsende Distickstoffoxidkonzentrationen (N<sub>2</sub>O) und zunehmenden Flugverkehrs;
- Änderungen der atmosphärischen Zirkulation.

Diese Möglichkeiten können zur Zeit aber nicht quantifiziert werden.

### 1.1.2 Ozonveränderungen über der Arktis

Ähnlich dramatische Ozonverluste wie über der Antarktis sind bisher in der Nordpolarregion nicht beobachtet worden. Der klare Trend in den Ozonkonzentrationen in höheren geographischen Breiten der Nordhemisphäre während der Wintermonate im Zeitraum 1970 bis 1986 ist jedoch ein deutlicher Hinweis darauf, daß ähnliche Prozesse wie in der Antarktis auch hier ablaufen. Während sich im großen die meteorologischen Bedingungen beider Polarregionen im Winter in der Ausbildung eines Polarwirbels mit star-

ker Westströmung qualitativ ähnlich sind, existieren große Unterschiede im Detail. Die nordpolare Stratosphäre ist aufgrund eines stärkeren Wärmetransports aus niedrigeren Breiten im Mittel etwa 10° Celsius wärmer als die des Südpols. Darüber hinaus wird sie durch planetarische Wellenbewegungen, die aus der Troposphäre eindringen, stark beeinflusst. Als Folge ist der Nordpolarwirbel schwächer ausgeprägt und weniger robust gegenüber Störungen als der Südpolarwirbel. In manchen Jahren ist die Wellenbewegung so intensiv, daß der Polarwirbel noch während des Winters aufbricht und sich die Region plötzlich erwärmt. Dieser Effekt wurde 1952 entdeckt (14) und ist seither als „Berliner Phänomen“ bekannt (15).

Als Folge dieses meteorologischen Unterschieds sind auch die Störungen der ClX- und NO<sub>y</sub>-Konzentrationen im arktischen Bereich im allgemeinen weniger stark als im antarktischen Bereich. Ein ausgeprägtes Ozonloch ist über der Arktis noch nicht beobachtet worden.

Im Winter 1989 hat die NASA unter Beteiligung einer Reihe von europäischen Forschergruppen eine Flugzeugmeßkampagne (Airborne Arctic Stratospheric Expedition, AASE) in der Nordpolarregion durchgeführt. Dabei wurden unter anderem die Mechanismen der Zerstörung und Umverteilung des Ozons, einschließlich der Beeinflussung durch Meteorologie und Bildung von polaren stratosphärischen Wolken, untersucht. Gemeinsam mit Satellitenbeobachtungen und bodengebundenen Meßverfahren ergeben sich damit folgende Erkenntnisse für das Ozon in der Stratosphäre der Nordpolarregion im Winter:

### TOMS – (Total Ozone Mapping Spectrometer) Satellitendaten

- Die zonal gemittelten Ozon-Gesamtsäulendichten für den Zeitraum Januar bis März 1989 unterscheiden sich kaum von dem langjährigen Mittel der Jahre 1979 bis 1988. Die zunehmenden Ozonkonzentrationen im Zeitraum Januar bis März lassen sich vollständig durch Transportphänomene wegen der Änderung der großräumigen Zirkulation erklären. Auffallend an den Daten des Jahres 1989 ist eine überdurchschnittlich starke Ozonzunahme im Verlaufe des Februars, deren Ursache eine plötzlich einsetzende Stratosphärenenerwärmung war. Es wurden Ozon-Gesamtsäulendichten von mehr als 500 Dobson-Einheiten beobachtet. Dieser Effekt belegt, daß die Verteilung des Ozons in der Stratosphäre der Nordpolarregion stark mit der Dynamik gekoppelt ist.
- Die Ozonverteilung über der Nordhemisphäre ist stark asymmetrisch. Dies kommt in einer zonalen Mittelung nicht zum Ausdruck. Abbildung 6 zeigt TOMS-Daten der Nordpolarregion für den 1. Februar 1989. Hierin ist deutlich ein starker Ozonverlust mit Ozongesamtsäulendichten unter 150 Dobson-Einheiten über Südsandinavien zu erkennen. Diese regional und zeitlich begrenzten Ozonverdünnungen (Mini-Löcher, Dauer ein bis zwei Tage) sind sehr wahrscheinlich dynamischen Ur-

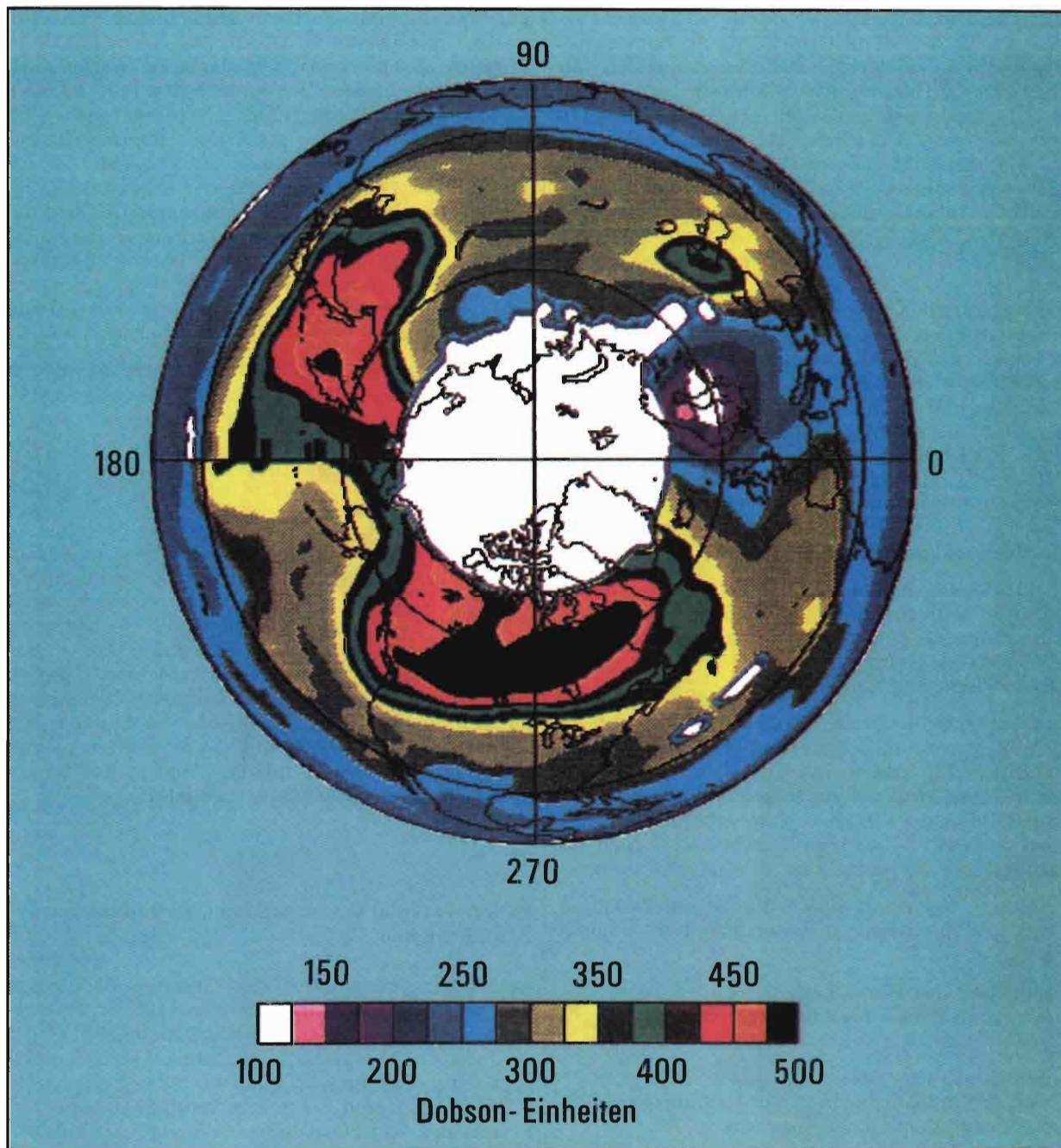


Abb. 6: TOMS-Messungen der Nordpolarregion am 1. Februar 1989. Der weiße Fleck im Zentrum der Darstellung repräsentiert die Bereiche der Polarnacht, für die das TOMS-Instrument keine Daten liefert (17).

sprungs und werden durch antizyklonische Aktivitäten der Troposphäre verursacht. Das Miniloch vom 1. Februar 1989 wurde auch durch Dobson-Messungen an der Station Oslo beobachtet (16). Frühere Miniloch-Ereignisse in der Nordpolarregion waren am 8. und 15. Januar 1987.

#### LIDAR — (Light Detection and Ranging) Messungen

Die großräumige Ozonverteilung wurde innerhalb der AASE-Kampagne mit einem flugzeuggetragenen LIDAR-System untersucht. Während zweier Flüge im

Februar 1989 über der Arktis wurden großräumige Ozonabnahmen von bis zu 17 Prozent innerhalb des Polarwirbels und oberhalb von 20 km Höhe beobachtet (18). Die Analyse der meteorologischen Bedingungen, gemeinsam mit der Beobachtung der Verteilung von Tracer-Molekülen wie  $N_2O$  legt den Schluß nahe, daß diese Ozonverluste nicht dynamisch, sondern chemisch erfolgt sind. Dies ist bisher der einzige direkte Hinweis auf chemisch induzierte und damit anthropogene Ozonverluste in der Nordpolarregion.

Die Meteorologie der Nordpolarregion während der 1989er AASE-Kampagne entsprach nicht dem langjährigen Mittel; die Januar-Temperaturen der polaren Stratosphäre waren die niedrigsten in den letzten

26 Jahren, und die planetarische Wellenaktivität war schwach. Diese Bedingungen waren günstig für die Ausbildung von polaren stratosphärischen Wolken über weiten Gebieten (vgl. Nr. 3.2.). Im Verlauf des Februars wurde der Polarwirbel stärker gestört; die Temperaturen stiegen über die langjährigen Mittelwerte. Gegen Ende des Monats Februar spaltete sich der Polarwirbel auf.

Die AASE-Kampagne war der erste Versuch, die Geschehnisse in der Nordpolarregion genauer aufzuklären. Es sind entscheidende neue Erkenntnisse gewonnen worden, aber die Wissenschaft ist weit davon entfernt, ein konsistentes Bild der Faktoren zu haben, die das Ozon in der Nordpolarregion beeinflussen. Insbesondere ist der Mechanismus der Kopplung von Chemie und Dynamik oder die „Durchlässigkeit“ der Grenzschicht des Polarwirbels gegen den Austausch mit Luftmassen in niedrigen Breiten unaufgeklärt. Schließlich fehlt das Verständnis der stärkeren Ozontrends während der Wintermonate noch völlig, auch wenn während der AASE-Kampagne regionale Ozonverluste beobachtet wurden.

## 1.2 Globale Veränderungen

Die Ozonkonzentration in der Stratosphäre ist eine zeitlich und räumlich sehr variable Größe. Will man zeitliche Trends bestimmen, muß man deshalb kleinere systematische Änderungen von großen periodischen und aperiodischen Schwankungen unterscheiden können. Die Zeitskala solcher Schwankungen reicht von täglichen Veränderungen aufgrund der atmosphärischen Bewegungen über jahreszeitliche Schwankungen, die durch großräumigen atmosphärischen Transport verursacht werden, bis zu dem elfjährigen Zyklus der Sonnenfleckenaktivität. Darüber hinaus existieren Schwankungen aufgrund der quasi-zweijährigen Oszillation (Quasi-biannual oscillation = QBO) und der episodischen Vulkaneruptionen.

Das Ausmaß von periodischen und aperiodischen Schwankungen der Ozonkonzentration ist nicht gut bekannt. Zum Zwecke der Analyse von systematischen Trends müssen Datensätze über mindestens zwei Zyklen der Sonnenfleckenaktivität zur Verfügung stehen, um diese Schwankungen identifizieren und durch geeignete statistische Analysen filtern zu können. Die Konsistenz der Meßreihen und eine ausreichende globale Verteilung der Meßstationen sind weitere Anforderungen an die verfügbaren Datensätze zur Trendanalyse.

Messungen der Ozongesamtsäule der Atmosphäre werden seit vielen Jahrzehnten mit bodengebundenen Instrumenten durchgeführt. Seit den siebziger Jahren kamen satellitengetragene Instrumente hinzu (vgl. 1. Bericht der Enquete-Kommission, Abschnitt C, 1. Kapitel, Nr. 2.6).

Obwohl die bodengebundenen Meßreihen zum Teil sehr viel länger als bis 1957 zurückgehen, wurde der Beginn der Auswertung der Datensätze auf dieses Jahr festgelegt, in dem im Zusammenhang mit dem Internationalen Geophysikalischen Jahr (IGY) erst-

mals die Anforderungen an Meßgenauigkeit und -stabilität definiert wurden. Die Ergebnisse aller Dobson-Beobachtungen in verschiedenen Breitenbändern der Nordhemisphäre sind in Abbildung 7 gezeigt. Diese Meßreihen erstrecken sich über nahezu drei Zyklen der Sonnenfleckenaktivität und sollten deshalb für eine detaillierte statistische Analyse und Herleitung globaler Trends geeignet sein. Eine Einschränkung aber ist die ungleiche geographische Verteilung der Meßstationen mit deutlichen Schwerpunkten in den mittleren Breiten der Nordhemisphäre (vgl. 1. Bericht der Enquete-Kommission, Abschnitt C, 1. Kapitel, Nr. 2.2.). Im Gegensatz dazu liefern die Satelliteninstrumente ein globales Bild; ihre Zeitreihen sind aber in der Regel noch zu kurz für zuverlässige Trendanalysen. Es kommt hinzu, daß Trends in Satellitendaten häufig auf instrumentelle Driften zurückzuführen sind, die nur im Vergleich mit den bodengebundenen Meßstationen zu korrigieren sind.

### *Ergebnisse von Trendanalysen*

#### *Ozone Trends Panel (OTP) (20)*

Die erste systematische Trendanalyse der Dobson-Meßreihen wurde 1988 durch das NASA/WMO Ozone Trends Panel (OTP), ein internationales Gremium von mehr als hundert Wissenschaftlern, vorgenommen. Dabei wurden die Meßreihen der Jahre 1970 bis 1986 getrennt für die drei Breitenbänder 30 bis 39°N, 40 bis 52°N und 53 bis 64°N analysiert und zonal gemittelt. Die Ergebnisse lassen sich wie folgt zusammenfassen (vgl. Abb. 8):

- Alle Breitenbänder zeigen systematische Abnahmen der Ozonkonzentration im Zeitraum 1970 bis 1986.
- Das Ausmaß der Ozonabnahmen beträgt minus 1,3 Prozent bei alleiniger Mittelung über die Sommermonate und minus 2,3 Prozent bei Mittelung über die ganzjährigen Meßreihen, jeweils bezogen auf den Zeitraum 1970 bis 1986.
- Die Abnahme in den Wintermonaten liegt im Mittel bei minus 4,4 Prozent mit Maximalwerten von minus 6,2 Prozent im Breitenband 53 bis 64°N, jeweils bezogen auf den Zeitraum 1970 bis 1986.
- Die beobachteten Trends können nicht durch bekannte natürliche Schwankungen erklärt werden.

Eine genauere Wiedergabe der OTP-Analyse ist im 1. Bericht der Enquete-Kommission, Abschnitt C, 1. Kapitel, Nr. 1 zu finden.

### *Weitere Analysen*

Die Dobson-Meßreihen der Nordhemisphäre wurden im Jahre 1989 durch weitere Arbeitsgruppen analysiert. Dabei wurde die Zeitreihe gegenüber der Analyse des Ozone Trends Panel bis 1988 ausgedehnt, und es wurden auch die Daten von vor 1970 einbezogen. Die zonale Mittelung wurde um eine regionale Mittelung ergänzt.

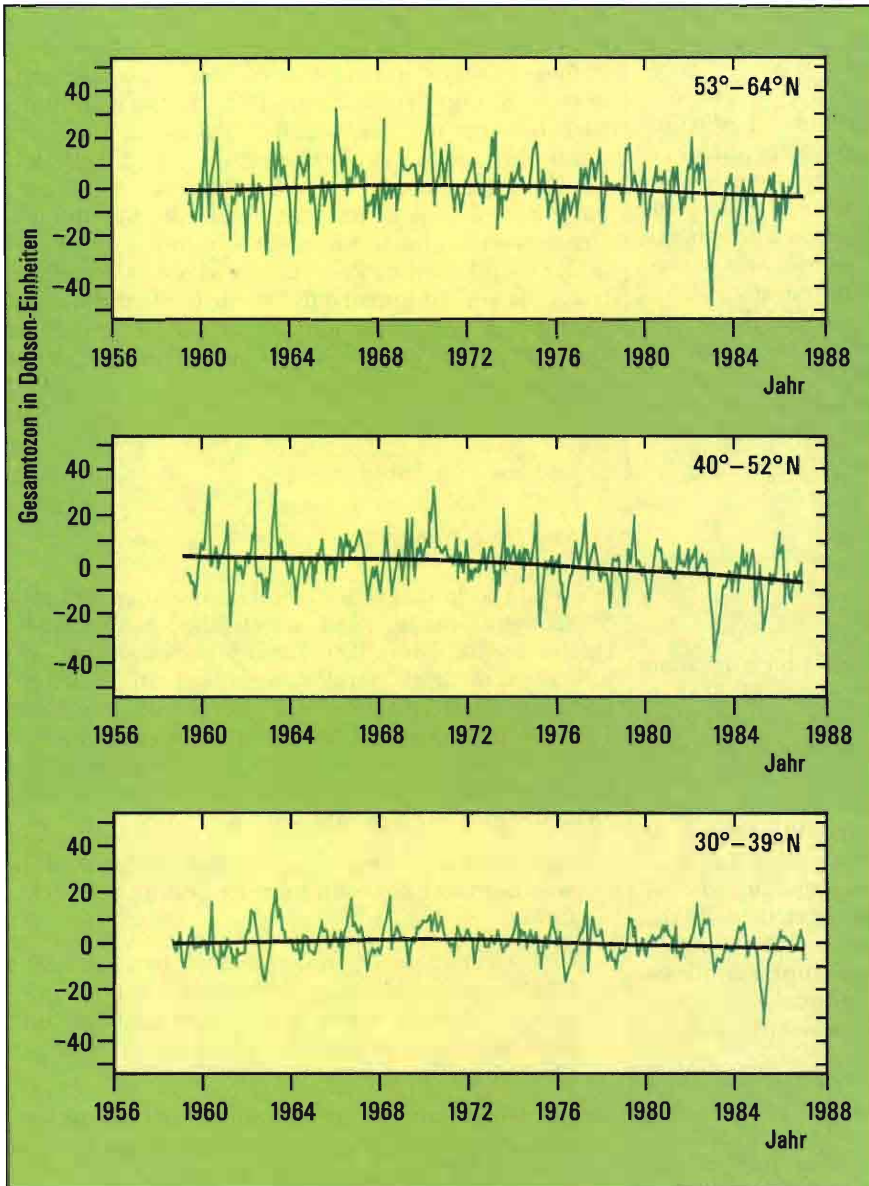
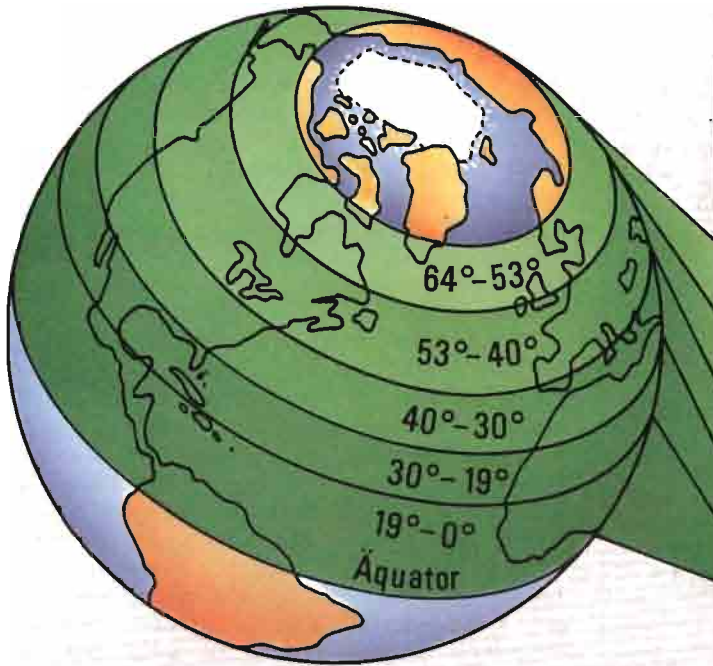


Abb. 7: Zeitliche Entwicklung der Monatsmittelwerte der Dobson Gesamtozonmessungen in verschiedenen Breitenbändern der Nordhemisphäre. Die Daten sind für die periodischen natürlichen Schwankungen (Jahreszeit, quasi — zweijährige Schwankung, Sonnenfleckenzyklus) bereinigt, zonal gemittelt und auf das Jahr 1970 normiert (19). Die durchgezogene Linie stellt die geglättete Kurve dar.

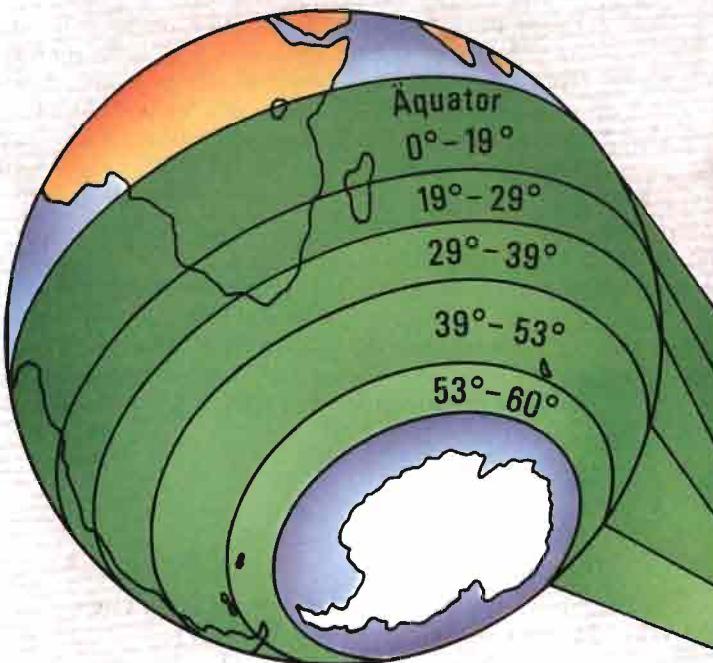


### Nordhemisphäre



Durchschnittliche Ozonabnahme Änderung in %

Global	Winter	Sommer
- 2,3	- 6,2	+ 0,4
- 3,0	- 4,7	- 2,1
- 1,7	- 2,3	- 1,9
- 3,1		
- 1,6		



Durchschnittliche Ozonabnahme Änderung in %

- 2,1
- 2,6
- 2,7
- 4,9
- 10,6

### Südhemisphäre

Abb. 8: Veränderung der Gesamt ozonmenge in verschiedenen geographischen Regionen (vgl. 1. Bericht der Enquete-Kommission, Abschnitt C, 1. Kapitel, Nr. 1.1.1).

Das Ergebnis der Trendanalyse ist in Tabelle 2 zusammengefaßt.

Tabelle 2

**Veränderungen des Gesamtozons der vergangenen zehn Jahre in Prozent basierend auf zonal gemittelten Dobson-Meßreihen bis 1986 beziehungsweise 1988 (21).**  
**Man beachte für eine vergleichende Betrachtung mit der OTP-Analyse, daß sich die dort gemachten Angaben auf den Gesamtzeitraum 1970 bis 1986 (vgl. Abb. 8 und 1. Bericht der Enquete-Kommission, Abschnitt C, 1. Kap., 1.1.1) beziehen.**

Geographische Breite	Ganzjährig		Differenz
	1986	1988	
55 ° N	-1,08	-0,99	0,1
45 ° N	-1,10	-0,94	0,2
35 ° N	-1,11	-0,88	0,2
Winter			
55 ° N	-3,02	-2,70	0,3
45 ° N	-2,34	-2,26	0,1
35 ° N	-1,66	-1,81	0,2
Sommer			
55 ° N	-0,35	-0,21	0,1
45 ° N	-0,68	-0,34	0,3
35 ° N	-1,01	-0,47	0,5

Die Analyse ist im wesentlichen konsistent mit den Befunden der OTP-Analyse, das heißt, es werden signifikante Ozonabnahmen beobachtet. Der Trend ist aber etwas weniger negativ, wenn man die Jahre 1987 und 1989 mit berücksichtigt. Dies gilt sowohl für die Jahresmittelkonzentration als auch für die Winter- und Sommermittel. Die größte Veränderung gegenüber der Zeitreihe bis 1986 beträgt +0,5 Prozent pro Dekade bei Mittelung über die Sommermonate bei 35°N.

Die Ergebnisse der Trendanalyse bei Mittelung der Meßreihen für die Regionen Nordamerika, Europa und Japan sind in Tabelle 3 zusammengefaßt.

Überraschenderweise sind die Trends regional nicht einheitlich. Die aus der zonalen Mittelung hergeleiteten Trends finden sich lediglich in Nordamerika und Europa wieder; für die Region Japan wird praktisch keinerlei Langzeittrend beobachtet. Während der Trend bei Mittelung über die Wintermonate in Nordamerika und Europa etwa gleich stark ausfällt, wird bei Mittelung über die Sommermonate ein statistisch signifikanter Trend nur in Nordamerika beobachtet. Die Ursache für die Regionalabhängigkeit der Ozontrends ist zur Zeit nicht geklärt.

#### Ergebnisse von Satelliten-Meßreihen

Satellitenmeßdaten des Gesamtozons sind wegen der relativen Kürze der Meßreihen nicht in gleichem Maße wie die Dobson-Meßreihen für Trendanalysen geeignet. Es kommt hinzu, daß Satellitenmeßinstrumente häufig Kalibrierungstrends zeigen, die nur anhand von bodengebundenen Messungen korrigiert werden können. Satellitenbeobachtungen bieten aber den einzigartigen Vorteil des globalen Bildes. Die Ergebnisse, die mit dem TOMS-Instrument auf dem NIMBUS-7 Satelliten gewonnen werden, zeigt Abbildung 9. Aufgetragen sind die Veränderungen der Zweijahresmittelwerte 1987/88 gegenüber dem Beginn der Meßreihe 1979/80. Danach nimmt nahezu überall auf der Erde die Ozonkonzentration ab. Auffallend ist der starke geographische Unterschied in den Ozontrends in mittleren Breiten der Nordhemisphäre, die auch bereits in den Dobson-Meßreihen zum Ausdruck kam. Die stärksten Trends werden dabei über dem Pazifik beobachtet. Sie betragen zwischen minus 4,5 und minus 7,5 Prozent im Zeitraum von nur acht Jahren. In der Südhemisphäre ist die Regionalabhängigkeit wesentlich schwächer. Die Ozonverluste werden durch die Vorgänge in der Südpolarregion dominiert.

Satellitenbeobachtungen sind auch geeignet, die Vertikalverteilung des Ozons und seine zeitlichen Änderungen herzuleiten. Aus den Ergebnissen von Beobachtungen mit den Satelliteninstrumenten SAGE I (Einsatzdauer: Februar 1979 bis November 1981) und SAGE II (Einsatzdauer: Oktober 1984 bis Dezember

Tabelle 3

**Veränderungen des Gesamtozons (in Prozent pro Dekade) in verschiedenen Regionen basierend auf Dobson-Meßreihen bis 1986 beziehungsweise 1988 (22).**

Region	Anzahl Stationen	Ganzjährig		Winter		Sommer	
		1986	1988	1986	1988	1986	1988
Nordamerika	10	-1,7	-1,6	-2,8	-2,9	-1,4	-1,2
Europa	11	-1,5	-1,4	-3,0	-2,9	-0,6	-0,3
Japan	4	+0,2	+0,5	-0,5	-0,6	+0,3	+0,8
26–64 ° N	25	-1,1	-0,9	-2,2	-2,2	-0,7	-0,3

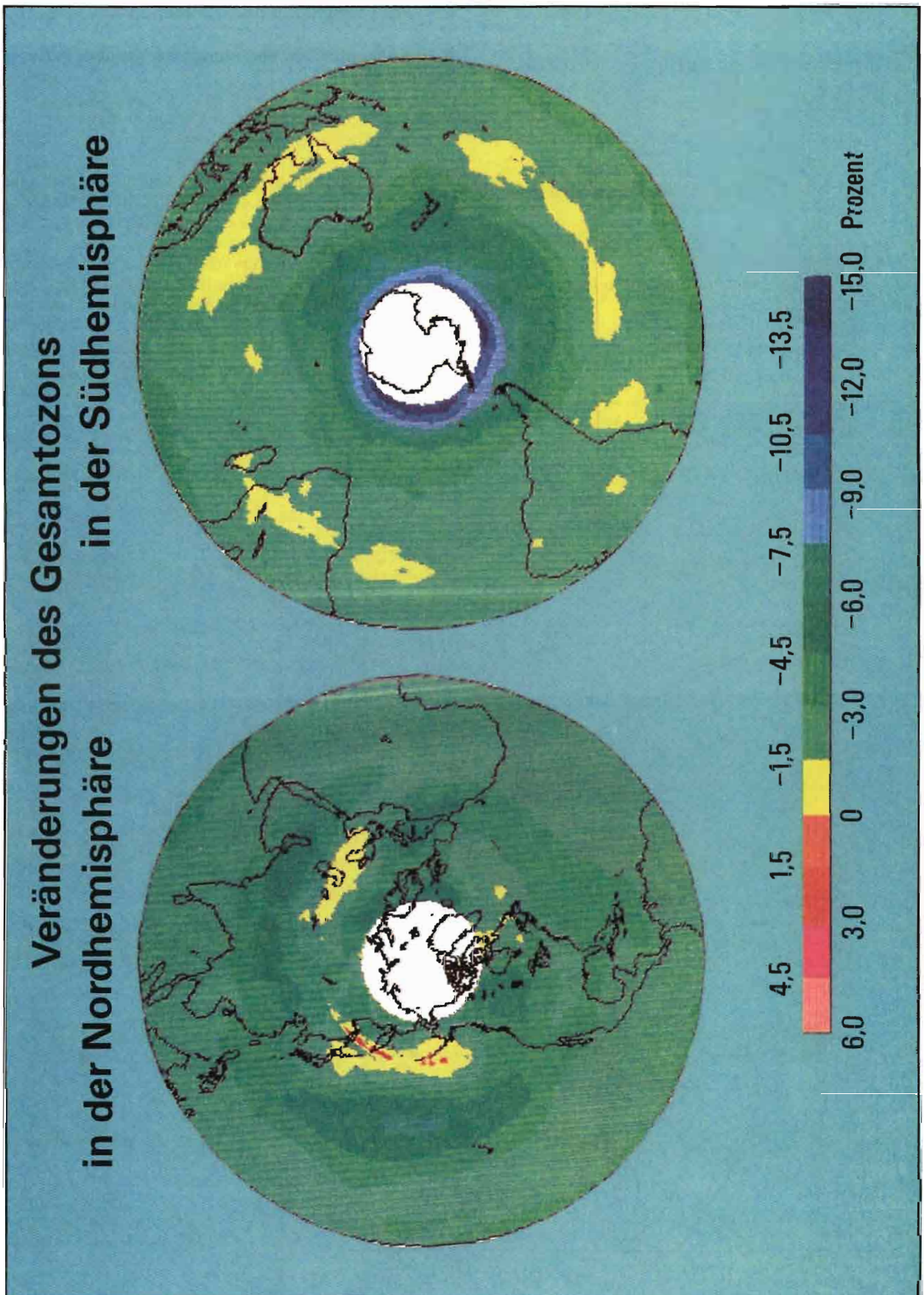


Abb. 9: Geographische Verteilung von Veränderungen des Gesamtzons, gemessen mit dem Satelliteninstrument TOMS für Nordhemisphäre (links) und Südhemisphäre (rechts). Aufgetragen sind prozentuale Änderungen zwischen den beiden Zweijahres-Mittelwerten 1987/88 und 1979/80 (23).

1988) ergeben sich folgende Veränderungen in der Ozonvertikalverteilung im Zeitraum 1980 bis 1986:

- Abnahme des Ozons im Höhenbereich zwischen 35 und 45 km mit Maximalwerten von  $3 \pm 2$  Prozent bei 40 km;
- Abnahmen des Ozons um  $3 \pm 2$  Prozent bei 25 km;
- keine Veränderungen in den Höhenbereichen 28 bis 33 km und 45 bis 48 km.

Da die absolute Ozonkonzentration in 25 km Höhe ihre größten Werte erreicht, sind die in dieser Höhe beobachteten Veränderungen entscheidend für den Verlust in der Ozon-Gesamtsäule. Die Veränderungen bei 40 km Höhe gehen nur sehr schwach in die Änderung der Gesamtsäule ein.

## 2. Wissenschaftliche Grundlagen

### 2.1 Konzentration, Verteilung und Variabilität des Ozons

Ozon in der Stratosphäre ist photochemischen Ursprungs. Das wesentliche Merkmal der vertikalen Konzentrationsverteilung ist die Ausbildung eines starken Maximums zwischen 20 und 30 km Höhe, in dem Ozonkonzentrationen von ungefähr  $5 \times 10^{12}$  Molekülen/cm<sup>3</sup>, entsprechend einem Mischungsverhältnis von etwa 10 ppm, erreicht werden. Dieses Maximum wird dadurch verursacht, daß die Photolyserate in einem Medium exponentiell zunehmender optischer Dichte entlang des Weges über einen Maximalwert verläuft. Die Photolyse von Sauerstoff, der einzigen Quelle für Ozon in der Stratosphäre, wird unter-

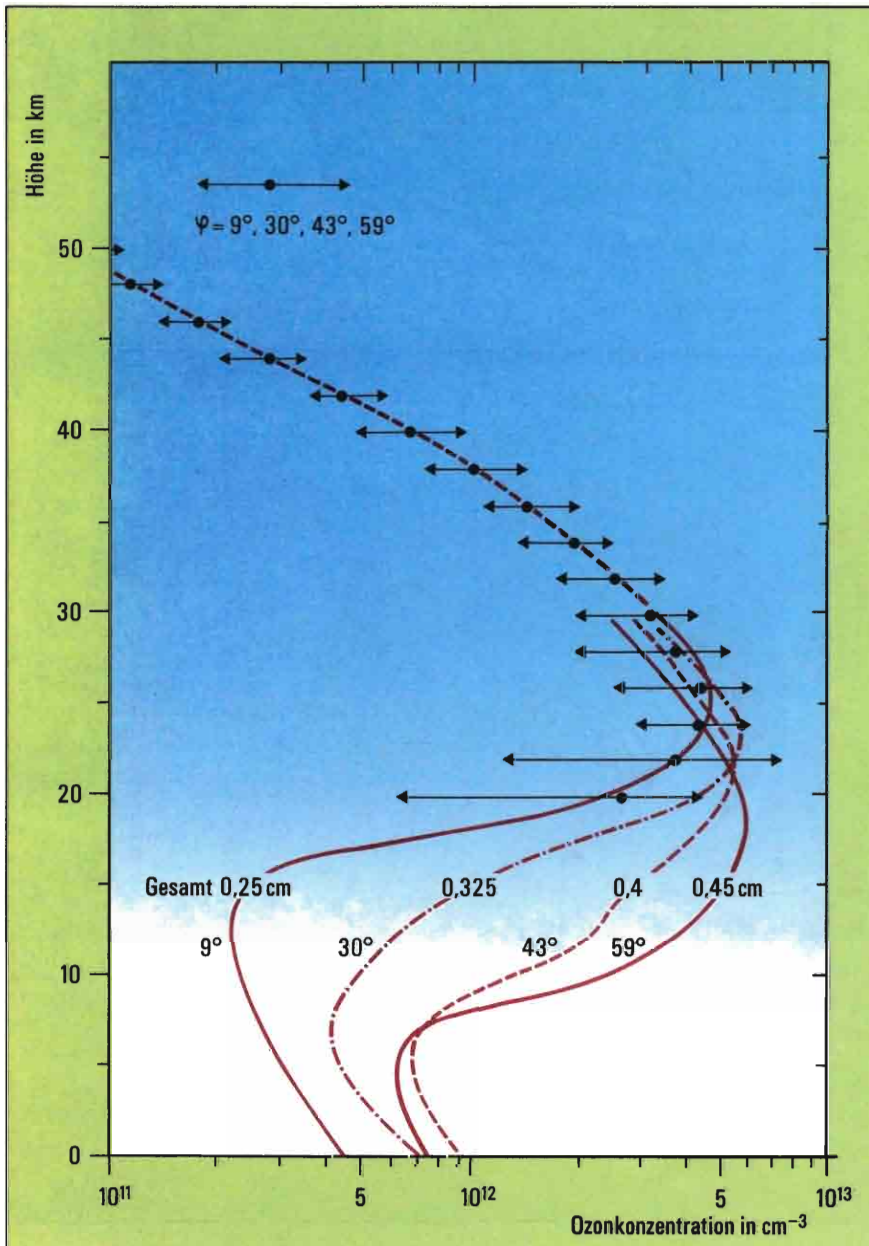


Abb. 10: Gemittelte Vertikalprofile des Ozons für verschiedene geographische Breiten der Nordhemisphäre im Frühjahr (24).

halb von etwa 20 km absolut unbedeutend, so daß die Ozonkonzentration mit der Höhe schnell abnehmen sollte. Dies ist aber nicht der Fall, da es durch vertikalen Transport auch in niedrigere Höhen (bis in die Troposphäre) gelangt und außerdem durch Smog-Reaktionen in der Troposphäre gebildet wird (vgl. Abschnitt C, 1. Kap., Nr. 1.4.5).

Die photochemische Bildung von Ozon findet hauptsächlich in der äquatorialen Stratosphäre statt. Diese empfängt im Verlaufe des Jahres stets nahezu die gleiche Sonnenintensität, so daß die Ozonverteilung im wesentlichen durch photochemische Prozesse bestimmt wird und im Laufe der Jahre wenig schwankt. Anders ist die Situation in höheren geographischen Breiten. Hier wird zwar auch Ozon photochemisch gebildet, die Hauptmenge entsteht jedoch durch den Zufluß aus der äquatorialen Stratosphäre. Dieser Zufluß ist wegen der Charakteristik der meridionalen Zirkulation am stärksten im Winter und Frühjahr der jeweiligen Hemisphäre. Dies bedeutet für die Nordhemisphäre, daß die höchsten Ozongesamtsäulendichten in Breiten von etwa 60°N im März/April erreicht werden; in der Südhemisphäre entsprechend im September/Oktober. Abbildung 10 zeigt gemittelte

Vertikalverteilungen des Ozons in verschiedenen geographischen Breiten der Nordhemisphäre im Frühjahr. Oberhalb von 20 km sind die Profile praktisch identisch, während unterhalb von 20 km der ausgeprägte transportbedingte Unterschied zum Tragen kommt. Die Gesamtsäulendichten bei 59°N und 9°N unterscheiden sich nahezu um einen Faktor zwei. Die Tatsache, daß das Ozon in höhere Breiten einschließlich der Polarregion im wesentlichen durch Transport gelangt, schließt aus, daß eine Zerstörung der Ozonschicht durch den Menschen von einem photochemischen „Heilungseffekt“ kompensiert werden könnte.

Die Veränderung der meridionalen Verteilung der Ozongesamtsäule im Verlaufe des Jahres ist in Abbildung 11 gezeigt.

Neben den Veränderungen der Ozongesamtmenge durch die Änderung der meridionalen Zirkulation unterliegt die Ozongesamtsäule auch starken kurzzeitigen Veränderungen. Nur oberhalb von etwa 20 km Höhe entsprechen gemessene Profile denen, die bei einer photochemischen Ozonbildung zu erwarten sind. Unterhalb von 20 km treten häufig schichtenförmige Veränderungen der Ozonkonzentration auf, die

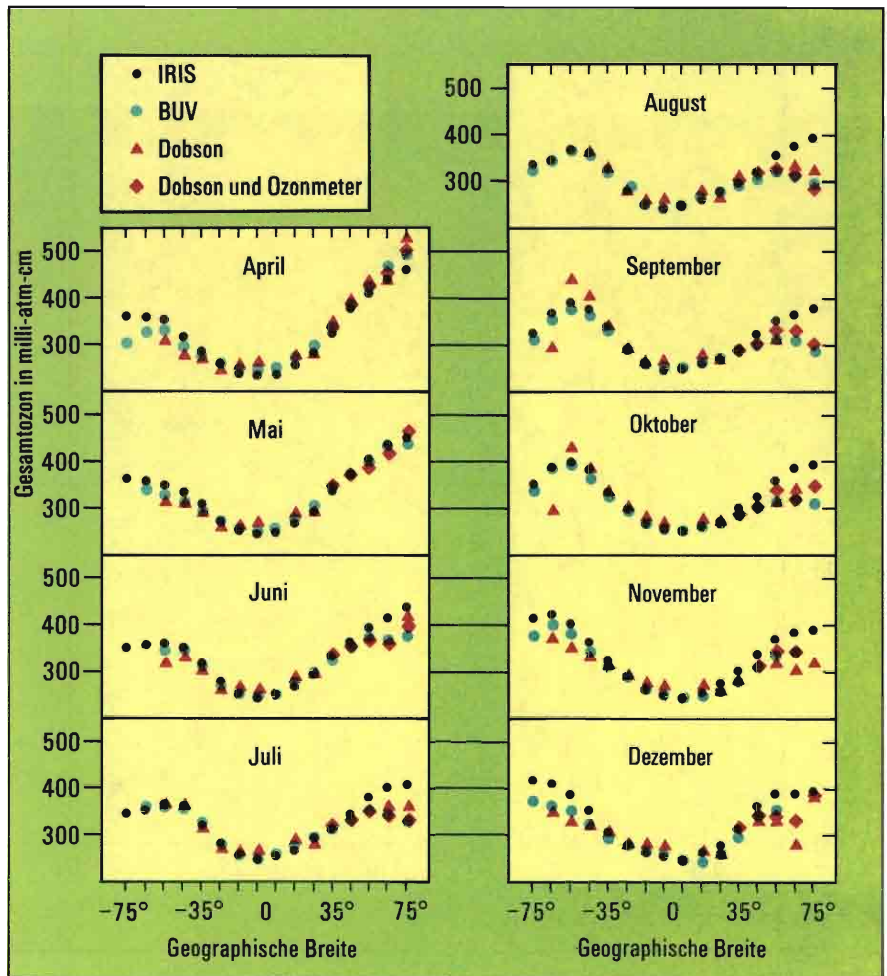


Abb. 11: Ozon-Gesamtsäulendichte in Dobson-Einheiten als Funktion der geographischen Breite und der Jahreszeit (25).

auf antizyklonische Bewegungen von Luftmassen aus der Troposphäre zurückzuführen sind. Es sind ähnliche Prozesse wie die, auf die vermutlich die sogenannten Minilöcher in höheren geographischen Breiten zurückzuführen sind, nur sind sie in mittleren und niederen Breiten generell schwächer ausgeprägt. Die Variation in der Gesamtsäule des Ozons aufgrund solcher kurzfristiger Einmischprozesse beträgt bis zu 30 Prozent in mittleren Breiten.

- Es bildet einen Schutzschild gegen die kurzweilige UV-Strahlung der Sonne;
- seine Verteilung bestimmt die Temperaturstruktur und damit die Dynamik der Stratosphäre;
- es ist an vielen chemischen und photochemischen Vorgängen beteiligt.

### 2.2.1 UV-Schutzfilter

Das Ozon absorbiert nahezu die gesamte Solarstrahlung im Wellenlängenbereich von 230 bis 320 nm, die nicht von den Hauptgasen der Atmosphäre, Sauerstoff oder Stickstoff, absorbiert werden kann und deshalb

## 2.2 Bedeutung des Ozons in der Stratosphäre

Ozon ist das einzige Spurengas der Erdatmosphäre, das folgende wichtige Funktionen erfüllt:

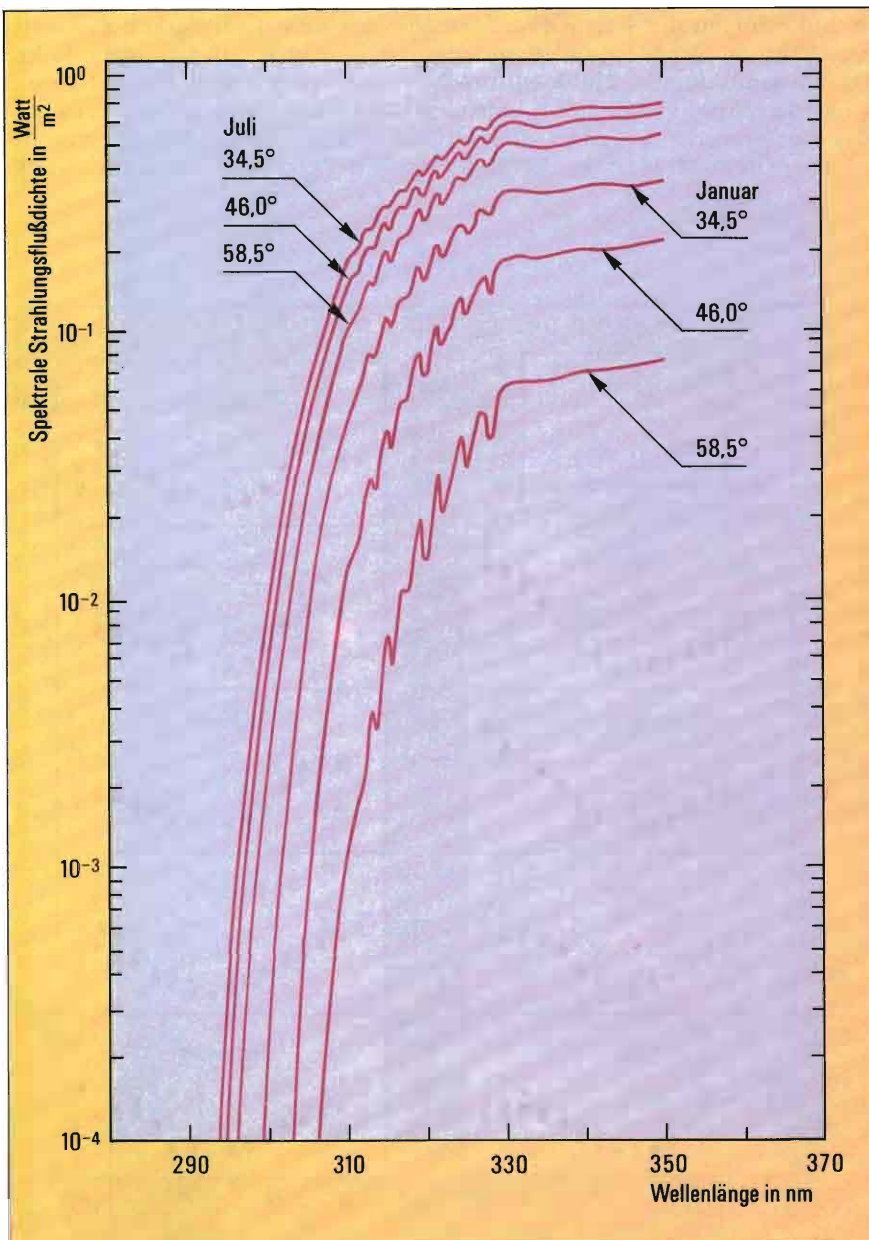


Abb. 12: Berechneter Verlauf der Strahlungsenergie im UV-B-Bereich für verschiedene geographische Breiten in den Monaten Januar und Juli. Die jeweils angenommene Ozonverteilung entspricht der des Jahres 1970 (26).

ohne Ozonschicht die Erdoberfläche erreichen würde. Strahlung in diesem Wellenlängenbereich greift die charakteristischen Makromoleküle der lebenden Zellen (zum Beispiel Proteine und Nukleinsäuren) an. Insbesondere der kurzwellige Anteil ist tödlich für niedere Organismen und die Zellen der Oberfläche höherer Organismen. Die langwelligere, weniger energiereiche UV-Strahlung im Bereich 290 bis 320 (UV-B-Strahlung) ist ebenfalls biologisch wirksam und führt bei genügend langer Exposition zu Schädigungen bei Menschen, Tieren und Pflanzen (vgl. 4. Kap., Nr. 4).

Veränderungen der Gesamtmenge des Ozons haben unter anderem Veränderungen in der Intensität der UV-B-Strahlung am Boden zur Folge. Für das Ausmaß dieser Intensitätsänderung spielt aber auch die Änderung der Ozonvertikalverteilung durch die Ozonbildung in der Troposphäre eine Rolle.

Wegen der meridionalen Unterschiede in Solarintensität und Ozonkonzentration zeigt die UV-B-Intensität in Bodennähe eine starke Abhängigkeit von der geographischen Breite. In Äquatornähe ist wegen der relativ kleinen Ozongesamtsäulen und der hohen Solarintensität die UV-B-Strahlung immer am stärksten. Sie nimmt zu den Polen hin ab; dabei ist die Abnahme im Sommer deutlich schwächer als im Winter. Abbildung 12 zeigt berechnete Strahlungsenergiedichten für verschiedene geographische Breiten im Januar und Juli.

Die UV-B-Intensität in Bodennähe wird neben der Ozonkonzentration auch durch andere Faktoren wie die Höhe über NN, die Schwefeldioxid (SO<sub>2</sub>) Konzentration, sowie durch Streuung an Molekülen und Teilchen beeinflusst. Aus diesem Grunde besteht kein direkter Zusammenhang zwischen der Ozonkonzentration in der Stratosphäre und der UV-B-Intensität in Erdbodennähe.

## 2.2.2 Temperatur und Stabilität der Stratosphäre

Lichtabsorption durch Moleküle bedeutet eine direkte Umwandlung von Strahlungsenergie in thermische Energie. Absorption ist deshalb auch ein Erwärmungsvorgang; in der Stratosphäre ist die Lichtabsorption durch das Ozon der entscheidende Wärmespender. Diese Absorption erfolgt in der oberen und mittleren Stratosphäre sowohl im UV-, als auch im sichtbaren Spektralbereich des Sonnenlichts. In der unteren Stratosphäre ist allein der sichtbare Spektralbereich wirksam. Allerdings kommt hier auch die Infrarotstrahlung, die von der Erdoberfläche und von der Troposphäre ausgeht, als Wärmespender für die Stratosphäre hinzu. Im thermischen Gleichgewicht kühlt sich die Stratosphäre im gleichen Maße ab, wie sie sich erwärmt. Die Abkühlung geschieht im wesentlichen durch die Emission des Kohlendioxids im infraroten Spektralbereich.

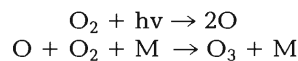
Die Erwärmung der Stratosphäre durch die Fähigkeit des Ozons zur Absorption erzeugt maximale Temperaturen von etwa 0° Celsius in 50 km Höhe. Damit ist die Stratosphäre deutlich wärmer als die darunter liegende Tropopause; der Temperaturgradient ist positiv. Deshalb ist die vertikale Durchmischung schwach,

die Stabilität hoch. Der Transport von Luftmassen in höhere (niedrigere) Schichten ist nämlich wegen der Abnahme des Drucks in der Atmosphäre mit der Höhe mit einer Expansion (Kompression) verbunden. Falls diese Expansion (Kompression) adiabatisch, das heißt ohne Wärmeaustausch mit den umgebenden Luftmassen, verläuft, so ist sie mit einer Abkühlung (Erwärmung) verbunden. Die Folge ist, daß nur ein negativer Temperaturgradient den vertikalen Luftmassenaustausch fördert; ein positiver Temperaturgradient, wie in der Stratosphäre, wirkt dagegen austauschhemmend.

## 2.3 Chemie des Ozons in der Stratosphäre

### 2.3.1 Photochemische Grundlagen

Wenn ein Molekül sich bei der Absorption von Licht spaltet, spricht man von Photodissoziation. In der Erdatmosphäre entstehen durch die Photodissoziation von molekularem Sauerstoff (O<sub>2</sub>) Sauerstoff-Atome (O), die in einer Rekombination mit einem weiteren Sauerstoffmolekül Ozon bilden:

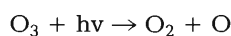


Hierbei ist  $h\nu$  ein aufgenommenes Photon im UV-Bereich. M ist ein für die Reaktion notwendiger Stoßpartner, der die freiwerdende Energie aufnimmt. Die Voraussetzung dafür, daß ein beliebiges Photon ein Molekül spalten kann, ist, daß es von dem Molekül absorbiert wird und ausreichend viel Energie besitzt, nämlich mindestens die Bindungsenergie der zu spaltenden Molekülbindung. Da die Bindungen von Spurengasen wie die von Sauerstoffmolekülen sehr stabil sind, ist Photodissoziation erst mit energiereichem UV-Licht möglich.

Für die Dissoziation des Sauerstoffs sind Photonen mit Wellenlängen unterhalb 242 nm notwendig (vgl. 1. Bericht der Enquete-Kommission, Abschnitt C, 1. Kap. Nr. 2.5). Photonen dieser Wellenlänge werden in der Atmosphäre stark geschwächt und sind deshalb erst oberhalb von 20 km Höhe in ausreichender Zahl vorhanden. Dies ist der Grund dafür, daß die photochemische Ozonbildung erst oberhalb dieser Höhe merklich einsetzt. Unterhalb von etwa 20 km ist eine Photodissoziation des Sauerstoffs und damit eine Ozonbildung über den oben genannten Mechanismus nicht möglich.

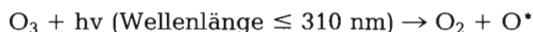
Moleküle mit schwächeren Bindungen können auch durch weniger energiereiche Photonen (wie zum Beispiel durch sichtbares Licht) gespalten werden. Dazu gehören zum Beispiel Stickoxid (NO<sub>2</sub>) und Ozon mit Grenzwellenlängen der Photodissoziation von 390 beziehungsweise 900 nm. Die Photodissoziation des NO<sub>2</sub> führt ebenfalls zur Bildung von Sauerstoffatomen und damit zur Entstehung von Ozon. Dies ist der einzige bekannte Bildungsprozeß von Ozon in der Troposphäre (vgl. Abschnitt C, 1. Kap., Nr. 1.4.5).

Durch die Photodissoziation von Ozon im sichtbaren Spektralbereich werden Sauerstoffatome zurückgebildet:



Dieser Prozeß wird aber sofort kompensiert durch die schnelle Rekombination der Sauerstoffatome mit  $O_2$  unter Rückbildung von Ozon. Die Sequenz von Ozonphotolyse und Rekombination erzeugt keine Netto-Änderung in der chemischen Zusammensetzung, es wird aber ständig Strahlungsenergie in Wärmeenergie umgewandelt (vgl. Nr. 2.2.2).

Erfolgt die Photodissoziation des Ozons mit Photonen im nahen UV-Bereich (Wellenlänge 310 nm oder darunter), so wird das entstehende Sauerstoffatom in einem angeregten Elektronenzustand ( $O^*$ ) gebildet



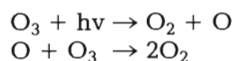
Ein solches angeregtes Atom kann im Gegensatz zu den Sauerstoffatomen im Grundzustand auch mit Spurengasen wie Wasserdampf und Methan reagieren, wobei die wichtigen Hydroxyl-(OH)-Radikale gebildet werden. Auf diesem Reaktionsweg wird das Ozon durch die Photolyse verbraucht.

Der Ozonverlust durch die Wirkung der anthropogenen Spurengase führt nicht zu dem sogenannten „Heilungseffekt“, einer entsprechenden Nachbildung von Ozon in tieferen Schichten. Wieviel Ozon sich an einem Ort bildet, läßt sich durch das Produkt von Photodissoziationskoeffizient des Sauerstoffs ( $J_{O_2}$ ) und Sauerstoffkonzentration ( $[O_2]$ ) beschreiben. Dieses Produkt nimmt mit der Höhe stark ab.

Der Grund für diese Abnahme ist die starke Schwächung des Photonenflusses bei Wellenlängen von 242 nm oder darunter, der für die Sauerstoffdissoziation notwendig ist. Ein anthropogener Ozonverlust kann deshalb grundsätzlich nicht durch Ozonnachbildung in niedrigeren Höhen kompensiert werden; die Wirkung einer tiefer durchdringenden Solarstrahlung ist nur geringfügig.

### 2.3.2 Katalytische Zyklen

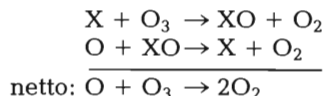
Ozon in der Stratosphäre wird ausschließlich photochemisch gebildet. Die wesentliche Quelle ist die Sauerstoffphotodissoziation, gefolgt von der Rekombination der Sauerstoffatome mit molekularem Sauerstoff (vgl. Nr. 2.3.1. und 1. Bericht der Enquete-Kommission Abschnitt C, 1. Kap., Nr. 2.5.) Wenn nur diese Reaktionen ablaufen würden, wären die Ozonkonzentrationen sehr hoch. Nur durch die gleichzeitige Abbaureaktion



wird das Ozon auf das Konzentrationsniveau eines Spurengases begrenzt. Die Reaktion zwischen Sauerstoffatomen und Ozon ist allerdings sehr langsam.

Die Kenntnis der Koeffizienten für die Photodissoziation von  $O_2$  ( $J_{O_2}$ ) und  $O_3$  ( $J_{O_3}$ ), gemeinsam mit den Geschwindigkeitskonstanten, erlaubt es, die stationäre Ozonkonzentration als Funktion der Höhe zu berechnen. Dies tat bereits 1930 S. Chapman zum erstenmal. Mit diesem einfachen Modell ergeben sich Ozonverteilungen, die in ihrer Form der Realität nahekommen, deren Gesamtsäulendichte aber die beobachteten Mengen um einen Faktor zwei übersteigt.

Die Frage, wie die Ozonverteilung richtiger zu beschreiben sei, blieb bis Anfang der fünfziger Jahre ungeklärt. Kein anderes bekanntes Spurengas schien in ausreichender Konzentration vorhanden zu sein, um das Ozonniveau auf die beobachteten Werte zu reduzieren. Der entscheidende Gedanke war die Idee der katalytischen Zyklen, in denen das Ozon reduziert wird, ohne die Konzentration des Katalysators zu beeinflussen (27), entsprechend dem Zyklus:



X ist ein Katalysator; zum Beispiel NO, H, OH, Cl, Br.

Die erste Spurenstoffklasse, bei der diese Eigenschaft entdeckt wurde, war die  $HO_x$ -Gruppe ( $X=OH$ ,  $XO=HO_2$ ). Diese Gruppe ist natürlichen Ursprungs. Sie wird gebildet durch Reaktion von angeregten Sauerstoffatomen ( $O^*$ ) mit Wasserdampf, Wasserstoff oder Methan. Der Einschluß der  $HO_x$ -Gruppe in ein Ozonmodell reduziert die Ozonmenge in der Gesamtsäulendichte um etwa 30 Prozent gegenüber der reinen Sauerstoffatmosphäre.

Von großer Bedeutung für die Chemie des Ozons in der Stratosphäre sind die Spurengaszyklen, die durch anthropogene Quellgase ausgelöst werden. Das NO-Radikal, das gemeinsam mit  $NO_2$  die  $NO_x$ -Gruppe bildet, entsteht in der Stratosphäre durch die Reaktion von angeregten Sauerstoffatomen mit Distickstoffoxid ( $N_2O$ ) (28).

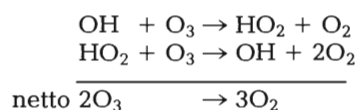


Dieser  $NO_x$ -Zyklus hat im Zusammenhang mit der beginnenden Diskussion über den Einfluß von Überschallflugzeugen (SSTs) Anfang der siebziger Jahre besondere Aufmerksamkeit erfahren (29, 30). Wenige Jahre später bereits kam die  $ClO_x$ -Gruppe ( $X=Cl$ ,  $XO=ClO$ ) hinzu (31, 32), zunächst unter dem Aspekt der Chlorinjektionen durch die Booster von Trägerraketen von Orbitalflugobjekten und dann im Hinblick auf die Wirkung der anthropogenen Fluorchlorkohlenwasserstoffe (FCKW). Die von den Halonen ausgehende Wirkung der  $BrO_x$ -Gruppe ( $X=Br$ ,  $XO=BrO$ ) wurde etwa zeitgleich beschrieben (33).

Die gemeinsame Eigenschaft dieser katalytischen Zyklen ist, daß die Netto-Reaktion  $O + O_3 \rightarrow 2O_2$ , die in einer reinen Sauerstoffatmosphäre nur sehr langsam abläuft, beschleunigt wird. Dadurch wird das Ozonniveau abgesenkt.

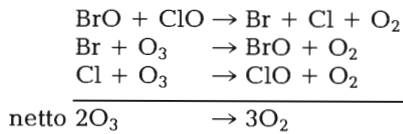
Folgende weitere Eigenschaften der Ozonabbau-Katalyse sind von entscheidender Bedeutung:

- Der Zyklus ist an die Gegenwart von Sauerstoffatomen gebunden. Dies begrenzt ihn auf Höhen oberhalb von etwa 25 km. Unterhalb dieser Höhe ist für die  $HO_x$ -Gruppe noch ein anderer Zyklus möglich:





Dieser Zyklus besteht aus der Netto-Reaktion,  $O_3 + O_3 \rightarrow 3O_2$ , die in einer reinen Sauerstoffatmosphäre nicht vorkommt. Ozon ist deshalb chemisch unterhalb von 25 km hauptsächlich durch  $HO_x$  kontrolliert. Ein ähnlicher Zyklus, der ebenfalls ohne Sauerstoffatome auskommt, ist der gekoppelte  $ClO_x/BrO_x$ -Zyklus:



Dieser Zyklus hat im Gegensatz zum oben genannten  $HO_x$ -Zyklus anthropogene Ursachen. Sein gegenwärtiger Beitrag zum Ozongesamtverlust ist noch klein. Es ist aber zu erwarten, daß er wegen der stark zunehmenden Konzentration der FCKW und Halone in naher Zukunft sehr viel bedeutender wird. Während in größeren Höhen die  $ClO_x$ - und  $BrO_x$ -Katalyse weitgehend unabhängig voneinander ablaufen, ist der gekoppelte  $BrO_x/ClO_x$ -Zyklus ein synergistischer Effekt von FCKW und Halonen.

- Die Kettenlänge der  $HO_x$ - und  $ClO_x$ -induzierten Zyklen wird durch  $NO_x$  begrenzt, da diese Spurengase in den Verbindungen  $HONO_2$ ,  $HO_2NO_2$  und  $ClONO_2$  gemeinsame Senken haben. Die Spurengase wirken also nicht nur additiv auf das Ozon ein, sondern sie sind stark untereinander gekoppelt. In der polaren winterlichen Stratosphäre wird diese Kopplung teilweise ausgesetzt. Als Folge kommt es zu einer sehr starken Wirkung der  $ClO_x$ -Gruppe allein.

## 2.4 Natürliche Einflußfaktoren auf das Ozon in der Stratosphäre

Ozon in der Stratosphäre wird durch eine Reihe von natürlichen Faktoren beeinflusst, die für die beobachteten Unterschiede (vgl. Nr. 2.1) in der Ozon-Gesamtsäulendichte an verschiedenen Orten oder in verschiedenen Regionen verantwortlich sind. Solche natürlichen Unterschiede in der Ozonkonzentration sind zum Teil recht groß; sie können aber nach heutiger Kenntnis nicht die beobachteten Langzeitrends des Ozons erklären.

### 2.4.1 Dynamik

Der weitaus größte Einfluß auf die Ozon-Gesamtsäulendichte an einem Ort der Erde geht von der Atmosphärendynamik aus. Diese hat unterschiedliche charakteristische Längen und Zeitskalen. Die großräumige Zirkulation, die sich mit der Jahreszeit umstellt, erzeugt ausgeprägte jahreszeitliche Änderungen der Ozon-Gesamtsäulendichte (vgl. Nr. 2.1). In mittleren Breiten der Nordhemisphäre gibt sich dies durch die Folge von Frühjahrsmaximum und Herbstminimum zu erkennen. In tropischen und subtropischen Breiten ist dieser Jahresgang erheblich schwächer (vgl. Abb. 11). Ein weiterer Effekt, der die Ozonsäulen-

dichte beeinflusst, geht von den Wettersystemen in der Troposphäre aus. Sie ändern die Ozon-Gesamtsäule durch eine Verschiebung der Tropopause, der Grenzschicht zwischen ozonarmer Luft der Troposphäre und ozonreicher Luft der Stratosphäre, sowie durch horizontale Mischung und Advektion. Tiefdruckgebiete (Zyklonen) sind normalerweise begleitet von niedrigen Tropopausenhöhen und hohen Ozon-Gesamtsäulendichten, während für Hochdruckgebiete (Antizyklonen) das umgekehrte der Fall ist. Die Zeitskala für solche Ozonänderungen ist die Zeitskala der Umstellung der synoptischen Wettersysteme und beträgt Tage bis Wochen.

Eine weitere dynamische Ursache von Ozonänderungen sind die quasi-zweijährigen Schwankungen (QBO: quasi-biannual oscillation). Hierunter versteht man die Änderung der Windrichtung in der äquatorialen Stratosphäre, normalerweise gemessen auf dem 50 mb-Druckniveau über Singapur, die sich mit einer mittleren Periode von 28 Monaten umstellt (34). Die QBO werden begleitet von Änderungen der Temperaturen und der Ozonkonzentration, nicht nur in tropischen, sondern auch in mittleren und hohen geographischen Breiten. Sogar die Stärke der Westwinde, die den winterlichen Polarwirbel in der unteren Stratosphäre umströmen, wird von den QBO moduliert mit schwächerer (stärkerer) Ausprägung während einer Ost (West)-Phase der QBO (35). Der Einfluß der QBO auf das Ozon in der Stratosphäre läßt sich folgendermaßen zusammenfassen (36):

- Die Ozon-Gesamtsäulendichten sind höher (niedriger) in einer Ost (West)-Phase der QBO.
- Das Ausmaß der Ozonänderungen zwischen den Extrema der QBO beträgt etwa vier Prozent.

Über den Einfluß auf die Ozonkonzentration in der globalen Stratosphäre hinaus scheinen die QBO auch die Stärke der Ausbildung des antarktischen Ozonlochs zu modifizieren (vgl. Nr. 1.1.1). Besonders niedrige Ozonwerte und Temperaturen sind anscheinend korreliert mit einer Westphase der QBO. Neueste Analysen (37) zeigen jedoch, daß diese Korrelation nicht streng erfüllt ist. Die starke Ausbildung des Ozonlochs 1989 war in der damaligen Phase der QBO unerwartet.

### 2.4.2 Sonnenfleckenzyklus

Die Solarintensität im ultravioletten Spektralbereich wird durch den elfjährigen Zyklus der Sonnenfleckenaktivität moduliert. Die Veränderungen der Intensität sind abhängig von der Wellenlänge und betragen 3 Prozent bei 260 nm, 9 Prozent bei 205 nm, 15 Prozent zwischen 175 und 220 nm und einen Faktor zwei bei der Wasserstoffspektrallinie (121,6 nm). Als Folge dieser Intensitätsschwankungen ändern sich Photolyse- und Erwärmungsraten der Stratosphäre, begleitet von Veränderungen in der Ozonkonzentration und der Temperatur.

Wegen der begrenzten Eindringtiefe der kurzwelligen UV-Strahlung in die Atmosphäre werden die stärksten Effekte des Sonnenfleckenzyklus für die Mesosphäre vorausgesagt, wo lokale Ozonzunahmen

von bis zu 80 Prozent im Maximum des Sonnenfleckenzyklus berechnet werden (vgl. Abb. 13). Die Änderungen in der Gesamtsäule des Ozons betragen aber nur wenige Prozent mit Maximalwerten von etwa 4 bis 5 Prozent in den Tropen. Für den Bereich der Arktis nahm das OTP in seiner Analyse Veränderungen der Ozonkonzentration durch den Sonnenfleckenzyklus von 1,8 Prozent an (38).

Abbildung 13 zeigt auch Bereiche mit Ozonverlusten im Sonnenfleckenmaximum, zum Beispiel in der oberen Stratosphäre bei 80°S am 1. September. Dies ist die Folge einer zusätzlichen photochemischen Bildung von Stickstoffmonoxid (NO), das in diesen Höhen als Katalysator für die Ozonerstörung wirkt.

Der Sonnenfleckenzyklus scheint nach neuesten Analysen auch mit der Stratosphärentemperatur in hohen Breiten und den Polarregionen korreliert zu sein (40). Ob diese Korrelation negativ oder positiv ist, hängt aber von der Phase der QBO ab. In Jahren höherer Sonnenfleckenaktivität sind die polaren Temperaturen ebenfalls hoch, wenn sich die QBO in einer Westphase befindet; dagegen sind sie niedrig während einer Ostphase. Da polare Ozonverluste nach heutiger Kenntnis im wesentlichen über die Temperatur geregelt werden, erlauben diese Befunde eine gute qualitative Voraussage der Steuerung polarer Ozonänderungen durch die Phase des Sonnenfleckenzyklus.

Es sei vermerkt, daß sich die Sonnenfleckenaktivität im Jahre 1990 nahe ihrem Maximum befindet. In der

nächsten Dekade wird deshalb der Rückgang der Sonnenfleckenaktivität voraussichtlich die vom Menschen ausgelöste Abnahme der Ozonkonzentration verstärken.

### 2.4.3 Vulkanismus

Vulkanausbrüche sind sporadische Ereignisse der Erdkruste, bei denen große Mengen Stäube und Gase in die Erdatmosphäre geschleudert werden. Die chemische Zusammensetzung der Gase hängt von der chemischen Vergangenheit der Erdkruste und des Erdmantels ab. Sie unterscheidet sich sehr stark von der heutigen Zusammensetzung der Atmosphäre und bedeutet deshalb eine Störung des atmosphärisch-chemischen Systems. Die Emission der Stäube ändert darüber hinaus die optischen Eigenschaften und die thermische Struktur der Atmosphäre mit vermutlich bedeutendem Einfluß auf die lokale und regionale Meteorologie sowie auf das globale Klima.

Die gasförmigen Komponenten der Vulkanemissionen sind hauptsächlich Wasserdampf (H<sub>2</sub>O), Kohlendioxid (CO<sub>2</sub>), Kohlenmonoxid (CO), Schwefeldioxid (SO<sub>2</sub>), Schwefelwasserstoff (H<sub>2</sub>S), Wasserstoff (H<sub>2</sub>), Ammoniak (NH<sub>3</sub>), Flußsäure (HF), Chlorwasserstoff (HCl), Stickstoff (N<sub>2</sub>) und Methan (CH<sub>4</sub>). Die Schwefelverbindungen SO<sub>2</sub> und H<sub>2</sub>S sind dabei von besonderem Interesse, da sie die wesentliche Quelle des Schwefelsäure-Aerosols in der Stratosphäre ausma-

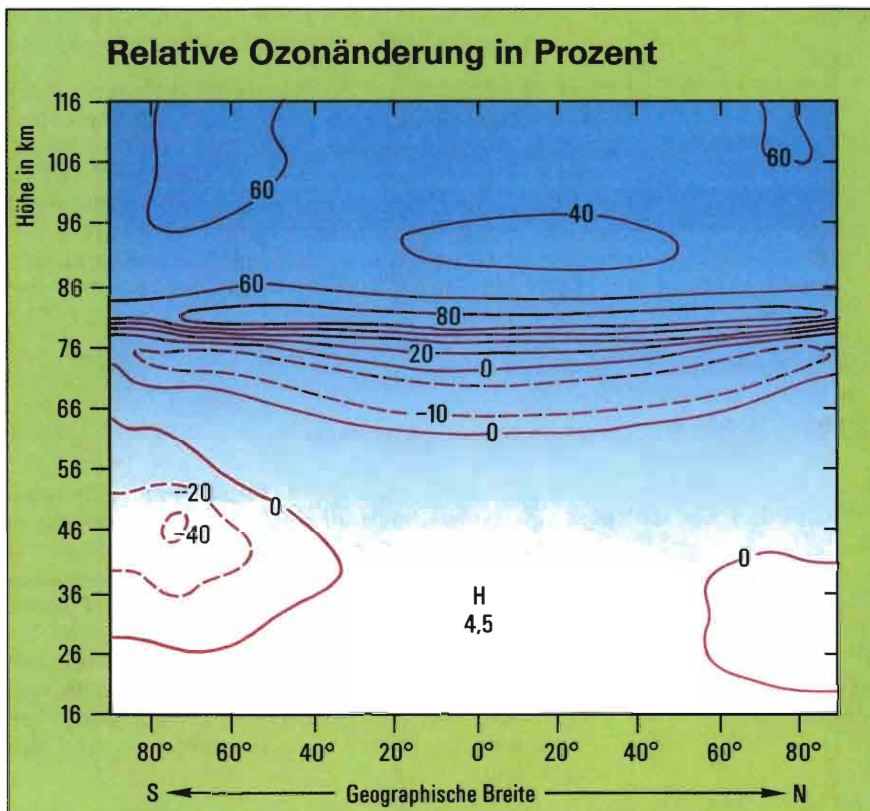


Abb. 13: Berechnete relative Änderungen der lokalen Ozonkonzentration durch den Sonnenfleckenzyklus als Funktion der geographischen Breite am 1. September in der oberen Stratosphäre (39).

chen. Der Beitrag der Vulkanaktivität dazu ist gegenüber den kontinuierlichen natürlichen Quellen nicht vernachlässigbar: Das in den Jahren 1982/83 in Höhen von 25 km beobachtete und aus  $H_2SO_4$ -Tröpfchen bestehende Aerosol war eine direkte Auswirkung des Ausbruchs des El Chicon (Mexiko) im April 1982 (41). Da Schwefelsäuretröpfchen sich nur langsam ablagern, beträgt die Verweilzeit des Aerosols in der Stratosphäre mehrere Jahre. Während dieser Zeit wird die zunächst auf die Region des Ausbruchs begrenzte Aerosolwolke transportiert und ausgebreitet und kann auch an weit entfernten Orten beobachtet werden. Der Ausbruch des El Chicon beispielsweise war deutlich in den LIDAR-Meßreihen des Fraunhofer-Instituts in Garmisch-Partenkirchen zu erkennen (vgl. Abb. 14). Die Streuintensität der Atmosphäre war mehrere Jahre lang um bis zu einem Faktor zehn erhöht (42).

Eine Zunahme des Aerosolgehalts in der Stratosphäre ist von einer Schwächung der Solarintensität durch Streuung begleitet. Gleichzeitig wird mehr Strahlung sowohl im sichtbaren als auch im infraroten Spektralbereich absorbiert. Als gemeinsame Folge wird die Stratosphäre stärker erwärmt und die Erdoberfläche gekühlt (vgl. Abschnitt C, 1. Kap. Nr. 3.3.2). Diese Effekte sind durch direkte Beobachtungen eindeutig belegt.

Der mögliche Einfluß von Vulkanausbrüchen auf die Ozonschicht in der Stratosphäre wird seit den frühen siebziger Jahren diskutiert. Nach dem Ausbruch des Mount Agung (Bali) im März 1963 kamen erstmals Vermutungen über einen Zusammenhang zwischen der Aerosolbeladung der Stratosphäre und dem Rückgang des Ozongehaltes auf (43). Vermutlich als Folge des El Chicon-Ausbruchs wurde im Winter 1982/83 an allen Dobson-Meßstationen in mittleren Breiten der Nordhemisphäre ein ähnliches Ozondefizit beobachtet (44).

Da solche Ozonverluste auch durch die QBO erzeugt werden können (45), ist ein Nachweis des ursächlichen Zusammenhangs schwierig. Nach einer Analyse langjähriger Meßreihen von Ozon- und Aerosolgehalt an den Stationen Hohenpeissenberg und Garmisch-Partenkirchen unter Berücksichtigung des QBO-Effekts gilt ein solcher Zusammenhang heute aber als sehr wahrscheinlich (46). Die chemische Ursache eines durch Vulkanaktivität induzierten Ozonabbaus ist aber vermutlich nicht allein die zusätzliche Chlorwasserstoff-Injektion. Vielmehr scheint nach neuesten Simulationsrechnungen das gebildete Schwefelsäure-Aerosol eine ähnliche Rolle bei der Aktivierung von Chlorverbindungen zu übernehmen, wie sie heute der polaren Stratosphäre zugeschrieben wird (47).

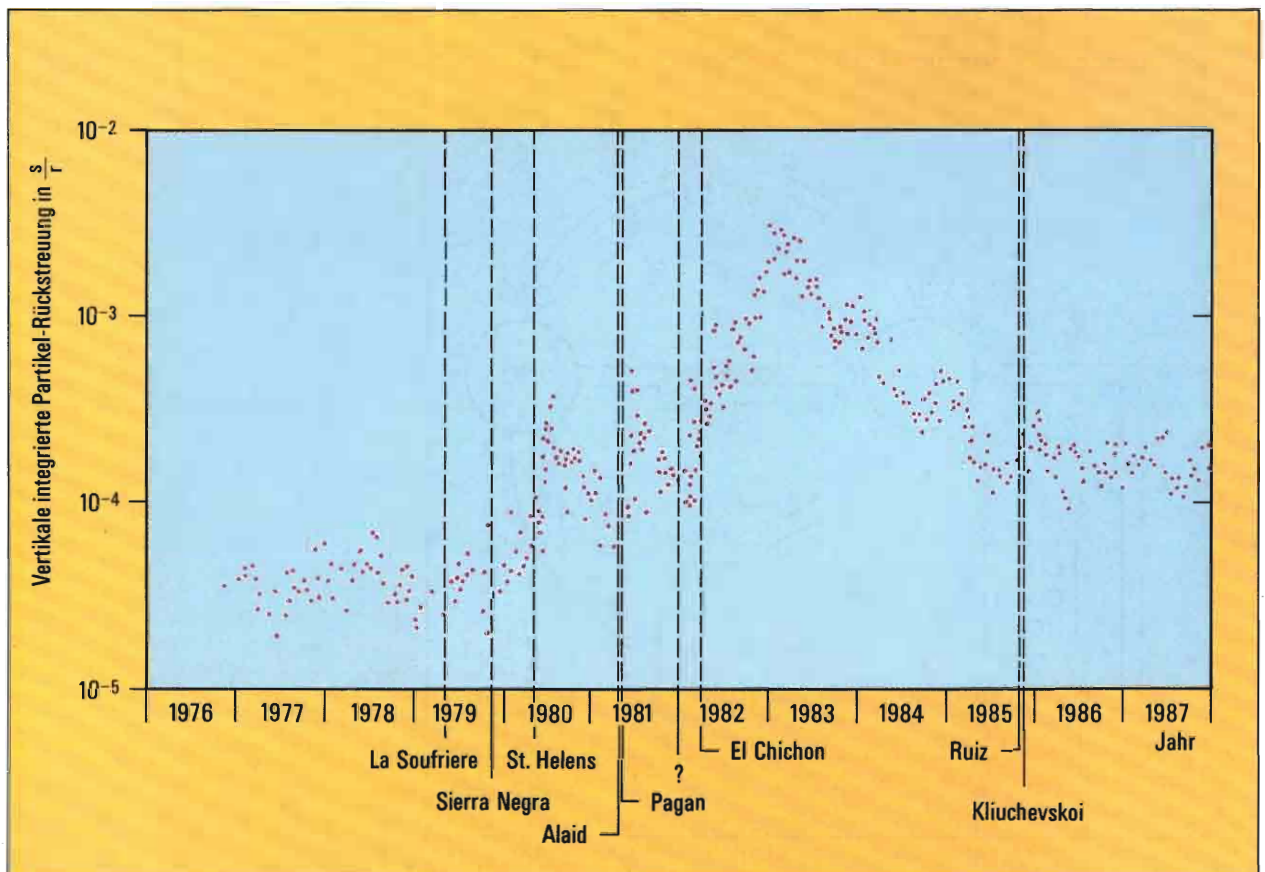


Abb. 14: Zeitlicher Verlauf der Rückstreuintensität eines LIDAR (Light Detection and Ranging)-Systems in Garmisch-Partenkirchen in den Jahren 1976 bis 1987.

### 3. Anthropogene Ursachen der Ozonzerstörung

Nach heutiger Kenntnis sind sowohl die globalen Trends der Ozon-Gesamtsäulendichte als auch die jährlich wiederkehrende Ozonabnahme über der Antarktis durch die zunehmende Konzentration anthropogener Spurengase, speziell der FCKW, verursacht. Die Mechanismen des Ozonabbaus in der globalen Stratosphäre unterscheiden sich aber deutlich von den komplizierteren Vorgängen in der polaren winterlichen Stratosphäre.

#### 3.1 Chemie des Ozonabbaus in der globalen Stratosphäre

Es wurde bereits erwähnt (vgl. Nr. 2.3.2. und 1. Bericht der Enquete-Kommission, Abschnitt C, 1. Kap. Nr. 2.5), daß die Ozonkonzentration in der globalen Stratosphäre durch katalytische Zyklen kontrolliert wird. In diesen Zyklen wirkt jede der katalytischen Spurenstoffgruppen ( $\text{NO}_x$ ,  $\text{HO}_x$ ,  $\text{ClO}_x$ ,  $\text{BrO}_x$ ) getrennt auf die Ozonkonzentration ein; die Spurenstoffgruppen sind untereinander aber stark gekoppelt. Abbildung 15 zeigt den atmosphärisch-chemischen Zyklus von  $\text{ClO}_x$ .

Die wesentliche Quelle von  $\text{ClO}_x$  in der Stratosphäre ist die Photolyse von FCKW und Tetrachlorkohlenstoff ( $\text{CCl}_4$ ). Für wasserstoffhaltige Verbindungen wie Methylchlorid ( $\text{CH}_3\text{Cl}$ ), Methylchloroform ( $\text{CH}_3\text{CCl}_3$ ) und H-FCKW spielt außerdem die Reaktion mit Hydroxyl-(OH)-Radikalen als Quellmechanismus eine Rolle. Von dem derzeitigen Chlorgehalt in der Stratosphäre von etwa 3 ppbv stammt allerdings nur etwa ein Fünftel aus der Zerlegung von Methylchlorid ( $\text{CH}_3\text{Cl}$ ), der einzig bekannten natürlichen Quellverbindung für das Chlor in der Stratosphäre. Der Rest wird durch ausschließlich anthropogene Verbindungen – im wesentlichen FCKW – verursacht.

Die durch Photolyse oder auf dem Wege der OH-Reaktion direkt oder indirekt freigesetzten Chlor-(Cl)-Atome reagieren mit Ozon unter Bildung des Chlormonoxid-Radikals ( $\text{ClO}$ ). Dieses wird durch Reaktion mit OH-, NO- und O-Atomen in Cl-Atome zurückgeführt und damit ein Zyklus geschlossen, in dem ein einziges Cl-Atom viele Ozonmoleküle (mehrere tausend) zerstören kann. Die Effizienz dieses Zyklus wird nur dadurch begrenzt, daß die Kettenträger Cl und  $\text{ClO}$  auch mit anderen Stoffen reagieren und in inaktive Senken überführt werden. Für das Cl-Atom sind es Reaktionen mit  $\text{CH}_4$ ,  $\text{CH}_2\text{O}$  und  $\text{HO}_2$ , in denen die

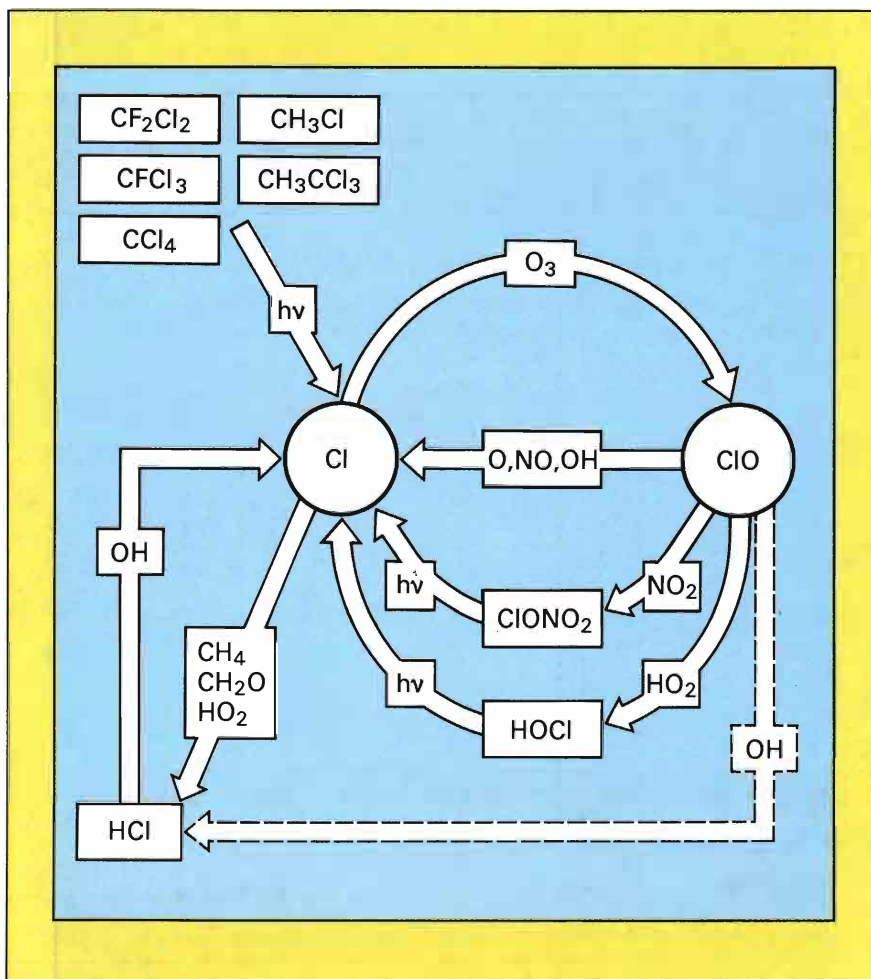


Abb. 15: Atmosphärisch-chemischer Zyklus von  $\text{ClO}_x$  (48, 49).

stabile Salzsäure (HCl) gebildet wird. HCl zählt wegen dieses Prozesses zu den häufigsten Chlorverbindungen in der Stratosphäre. Ihre Bildung ist jedoch keine permanente Senke, da die Cl-Atome durch Reaktionen von HCl mit OH-Radikalen wieder freigesetzt werden können.

Ähnlich wie Cl-Atome können auch ClO-Radikale aus dem aktiven System zeitweise entfernt werden. Hier sind es im wesentlichen die Reaktionen mit NO<sub>2</sub> und HO<sub>2</sub>, wobei ClONO<sub>2</sub> und HOCl gebildet werden. Wenn NO<sub>2</sub> nicht vorhanden ist, wie es in der polaren winterlichen Stratosphäre der Fall ist, kommt es zu einem starken Anstieg der Konzentration an ClO-Radikalen (vgl. Nr. 3.2).

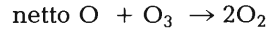
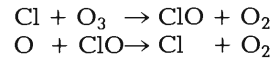
Die hier beschriebenen chemischen Abläufe sind in allen heutigen Modellen des Ozons in der Stratosphäre enthalten. Insgesamt werden Mechanismen mit weit über hundert Reaktionen behandelt, die etwa dreißig bis vierzig verschiedene Spezies beinhalten. Die Komplexität wird erzeugt durch die Kopplung der Spurengasgruppen untereinander. Eine Veränderung von ClO<sub>x</sub> zum Beispiel erzeugt nicht nur eine Zunahme des ClO<sub>x</sub>-induzierten Ozonabbaus, sondern auch eine stärkere Bindung von NO<sub>x</sub> (Bildung von ClONO<sub>2</sub>) und damit eine Schwächung des NO<sub>x</sub>-induzierten Ozonabbaus.

Die beobachteten Trends der Ozonkonzentration im globalen Bereich sind im wesentlichen konsistent mit

den Voraussagen der Modelle für den Fall einer veränderten ClO<sub>x</sub>-Konzentration. Dies gilt nicht für die Polgebiete und nicht für die Wintermonate in höheren geographischen Breiten. Hier sind die beobachteten Trends erheblich stärker, als es die globalen Modelle voraussagen.

### 3.2 Chemie der polaren Stratosphäre

Nach heutiger Kenntnis ist die Ausbildung des Ozonlochs eine Kombination von meteorologischer Konditionierung und anthropogener Störung der Ozonchemie. Der für die globale Stratosphäre postulierte ClO<sub>x</sub>-induzierte Ozonabbauzyklus



kann allerdings in der polaren Stratosphäre nicht ablaufen, da die tiefstehende Frühjahrs Sonne nicht die Bildung von Sauerstoffatomen erlaubt. Es sind deshalb andere, modifizierte Ozonabbauzyklen notwendig, die erst durch die meteorologische Konditionierung möglich werden.

Die Meteorologie der südpolaren Stratosphäre während des Winters ist gekennzeichnet durch langsam absinkende Luftmassen, die durch Strahlungsprozesse gekühlt werden. Diese Luftmassen werden von

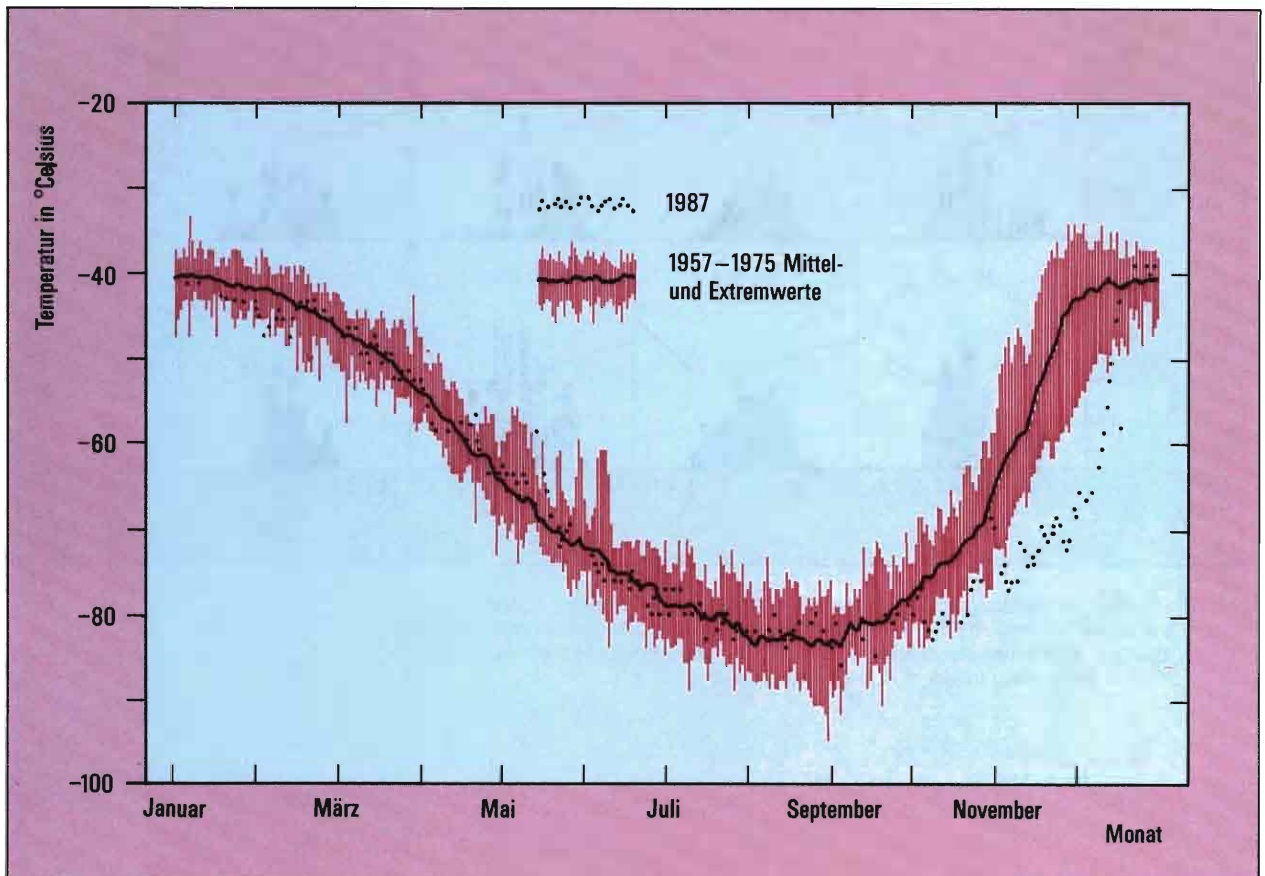


Abb. 16: Jahresverlauf der Temperaturen in 14 km Höhe über der britische Antarktisstation Halley Bay im Zeitraum 1957 bis 1975 (50).

einem starken circumpolaren Westwind eingeschlossen, und damit wird der Austausch mit Luftmassen in niederen Breiten verhindert. Dieser Prozeß beginnt bereits im März/April jeden Jahres, wobei Temperaturen von minus 60° Celsius unterschritten werden. Zum Zeitpunkt der maximalen Abkühlung im Juli/August werden Temperaturen von minus 80° bis minus 90° Celsius erreicht. Abbildung 16 zeigt den Jahresverlauf der Temperaturen in 14 km Höhe im Zeitraum 1957 bis 1975. Der Wiederanstieg der Temperatur beginnt etwa Ende August, wenn das erste Sonnenlicht die untere Stratosphäre erreicht. Die Atmosphäre wird im wesentlichen durch Absorption von Licht im nahen UV-Bereich durch das Ozon aufgeheizt. Die Geschwindigkeit des Temperaturanstiegs

hängt deshalb von der Ozonkonzentration ab. Das tiefe Ozonloch 1987 hat das Aufheizen der Atmosphäre über der Antarktis deutlich verzögert.

Ein entscheidender begleitender Effekt, der mit der Temperaturabnahme verbunden ist, ist die Ausbildung von polaren stratosphärischen Wolken (PSC's). Diese sind deutlich als wiederkehrende Ereignisse in den Messungen der optischen Dichte der polaren Stratosphäre zu erkennen. Die Gesamtbeladung der Stratosphäre mit Aerosolen wird zwar weitgehend durch die großen Vulkaneruptionen bestimmt. Über der Antarktis wird aber jährlich im Zeitraum Juli bis Oktober ein besonders hoher Aerosolgehalt beobachtet, der den PSC's zugeordnet wird. Ähnliches wird

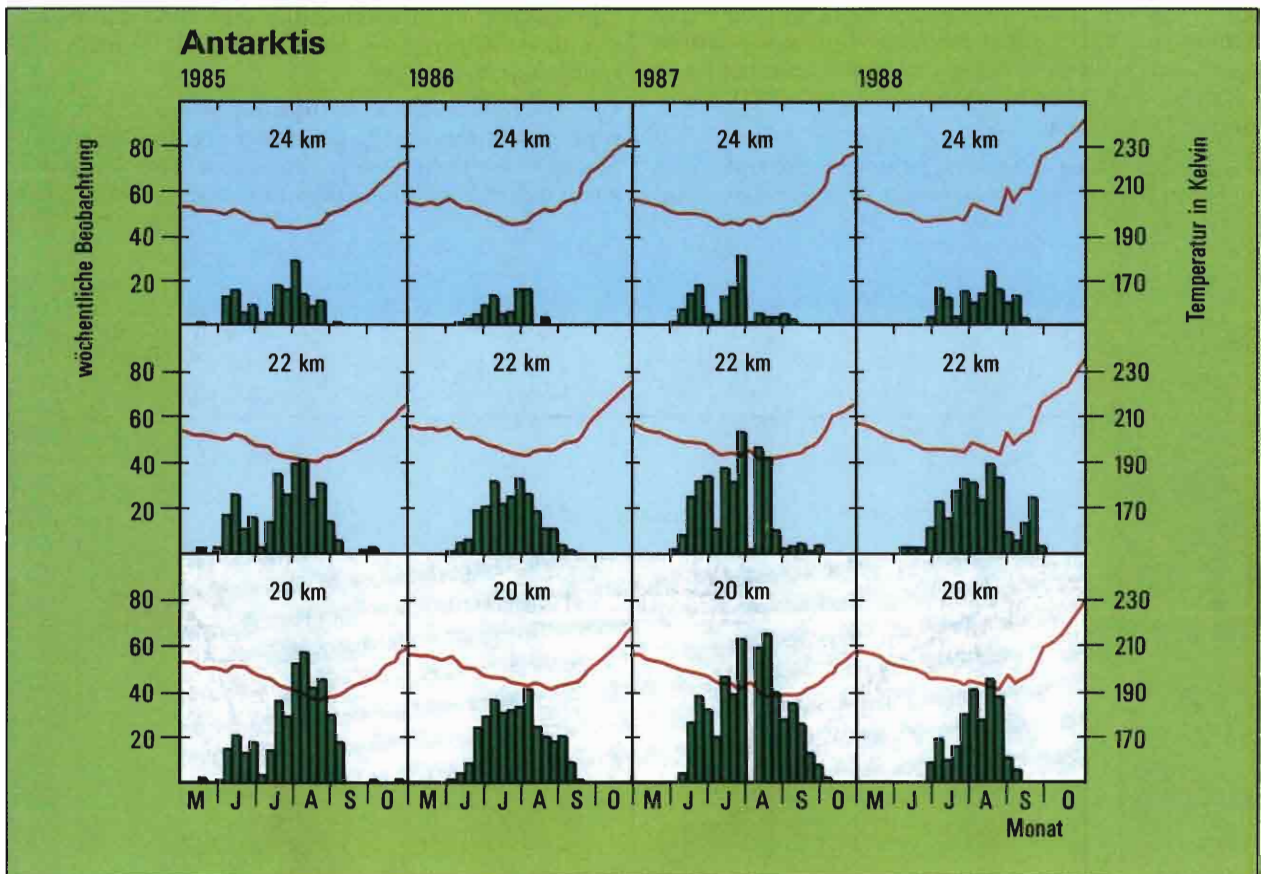


Abb. 17: Satellitenbeobachtungen der jahreszeitlichen Häufigkeitsverteilung von polaren stratosphärischen Wolken (PSC's) über der Antarktis (links) und Arktis (rechts) in den Jahren 1984 bis 1988 in verschiedenen Höhen. Die durchgezogene Linie stellt die gemessene mittlere Temperatur in jedem Höhenbereich dar (51).

mit einer Verschiebung von sechs Monaten auch in der nordpolaren Stratosphäre beobachtet, jedoch wesentlich schwächer.

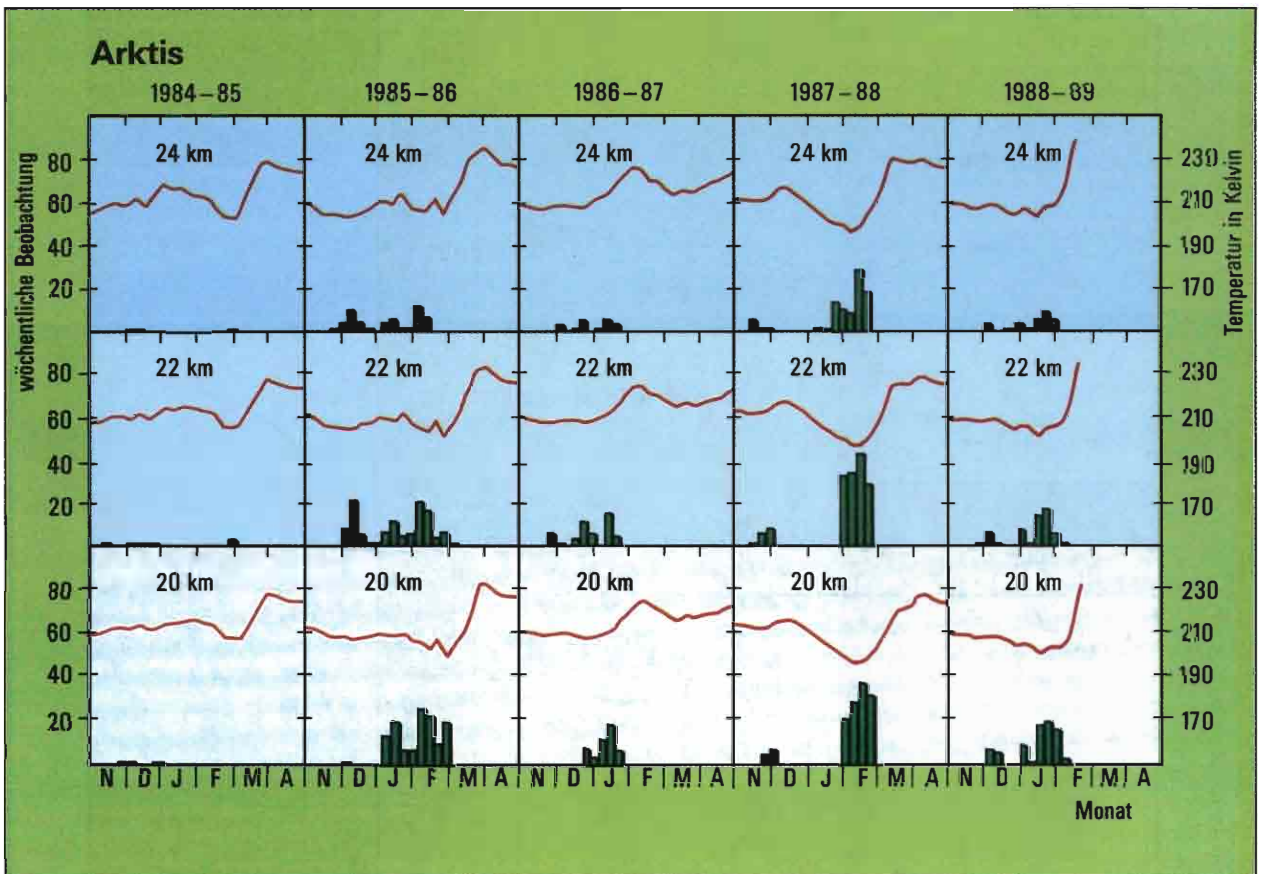
Abbildung 17 zeigt die Ergebnisse von Satellitenbeobachtungen der PSC-Häufigkeit in beiden Polarregionen im Zeitraum 1984 bis 1988. Gemeinsam mit anderen Beobachtungen ergeben sich folgende charakteristische Unterschiede:

- In allen Jahren und in allen Höhen werden erheblich mehr PSC's über der Antarktis als über der Arktis beobachtet. Über der Antarktis sind PSC's typischerweise zehn- bis hundertmal häufiger.
- Ihre maximale Dichte haben die PSC's über der

Antarktis in 16 bis 18 km und über der Arktis in 20 bis 22 km Höhe.

- In der Südpolarregion existieren die PSC's in allen Jahren erheblich länger ausgedehnt als über dem Nordpol.

Diese Unterschiede sind das Ergebnis der unterschiedlichen meteorologischen Bedingungen in den winterlichen Polarregionen der beiden Hemisphären. Die Nordpolarregion ist im Winter im Mittel etwa 10° Celsius wärmer als die Südpolarregion. Es kommt hinzu, daß der Nordpolarwirbel weit weniger stabil ist und die nordpolare Stratosphäre häufig bereits im Winter durch das Einfließen warmer Luftmassen



plötzlich sehr stark erwärmt wird. Dabei sollten PSC's schnell sublimieren.

Woraus bestehen diese PSC's, und warum sind sie für einen Ozonabbau von Bedeutung? Gemeinsame Erkenntnisse aus Laboruntersuchungen und Feldmessungen haben zu dem Ergebnis geführt, daß es zwei verschiedene Arten von PSC's gibt:

- Salpetersäure/Wasser-Aerosole mit der Stöchiometrie eines Trihydrats (Nitric Acid Trihydrate (NAT), chemische Formel  $\text{HNO}_3 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$ ). Sie entstehen bei Temperaturen unterhalb minus  $80^\circ$  Celsius; ihre Teilchengröße ist etwa ein Mikrometer. Während ihres Wachstums und bei tieferen Temperaturen wird weiteres Wasser und Salzsäure in das Aerosol eingeschlossen.

- Reine Wasser-Eis-Kristalle: sie entstehen bei Temperaturen von minus  $90^\circ$  Celsius oder darunter; ihre Teilchengröße ist ungefähr zehn Mikrometer. Wegen dieser Größe neigen diese PSC's dazu, in die Troposphäre abzusinken und so die polare Stratosphäre zu dehydrieren.

Wegen der unterschiedlichen Kondensationsbedingungen wird während der Abkühlung der Stratosphäre immer das Salpetersäure-Aerosol zuerst gebildet. Während die Temperaturen der winterlichen Südpolarregion auch die Bildung des Eis-Aerosols erlauben, ist vermutlich in der Nordpolarregion das Salpetersäure-Aerosol dominierend.

Das Auftreten der polaren stratosphärischen Wolken ist aus heutiger Sicht eine notwendige Voraussetzung

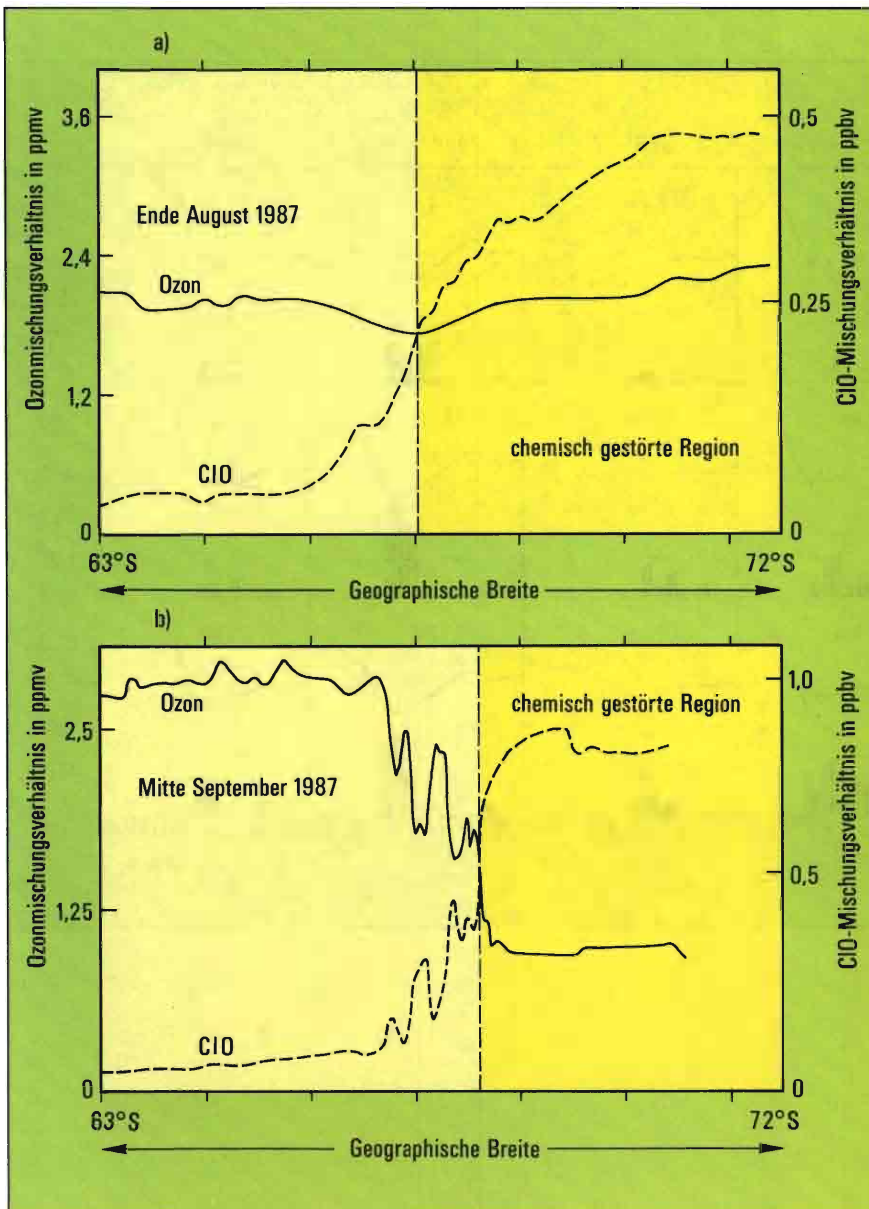
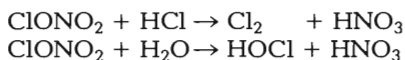


Abb. 18: Vergleich von Ozon- und ClO-Profilen als Funktion der geographischen Breite der Südhemisphäre (63-72°S) Ende August 1987 (oben) und Mitte September 1987 (unten).



für die Ozonverluste in der polaren Stratosphäre wie zum Beispiel bei der Ausbildung des Ozonlochs. PSC's sind chemisch nicht inert. Durch Reaktionen von ClONO<sub>2</sub>, einer der bedeutendsten Senken von aktivem Chlor in der globalen Stratosphäre, mit Salzsäure oder Wasser an den Oberflächen der PSC's kommt es zur Bildung von Cl<sub>2</sub> beziehungsweise HOCl:

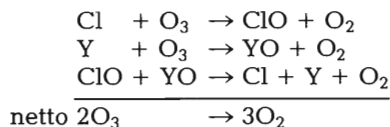


Dieses entspricht einer Umverteilung von Chlor aus wenig aktiven Senken in aktivere Formen bei gleichzeitiger Auskondensation der Stickstoffkomponente. Diese Prozesse laufen im Dunkeln während des Polarwirls ab.

Für den zeitlichen Ablauf der Ausbildung des Ozonlochs ist weiterhin das Aufgehen der Frühjahrs-sonne entscheidend. Die Strahlung der tiefstehenden Sonne enthält wenig energiereiche Photonen und vermag nur Moleküle mit genügend langwelliger Absorption zu spalten. Dies ist bei Cl<sub>2</sub> und HOCl der Fall. Die freigesetzten Cl-Atome reagieren mit Ozon unter Bildung von ClO, dessen Konzentration dabei stark ansteigt, ohne daß es zunächst zu einem stärkeren Ozonverlust kommt (vgl. Abb. 18).

Ein Ozonverlust setzt erst dann ein, wenn sich ein neuer katalytischer Zyklus des Ozonabbaus etabliert

hat. Dieser kann aber nicht in der konventionellen ClO<sub>x</sub>-Kette (vgl. Nr. 3.1) bestehen, da praktisch keine Sauerstoffatome vorhanden sind, die über O + ClO → Cl + O<sub>2</sub> die Cl-Atome zurückbilden und den Kataly-sezyklus schließen könnten. Es sind deshalb modifi-zierte Katalyzezyklen von der Form



notwendig, wobei als Kettenträger Y=Cl, Br oder OH in Frage kommen.

Aus heutiger Sicht ist der reine ClO<sub>x</sub>-Mechanismus (in dem der Kettenträger Y das Cl ist) aufgrund der hohen ClO-Konzentration am wahrscheinlichsten. Quantita-tive Abschätzungen sind konsistent mit einer Zeitkon-stante des Ozonabbaus von etwa 15 Tagen, wie es bei der Ausbildung des Ozonlochs beobachtet wird.

Die Sequenz von PSC-Bildung, Aktivierung der Chlorkomponenten durch heterogene Reaktionen und Ozonabbau-Katalyzezyklus durch Disproportio-nierung der ClO-Radikale ist schematisch in Abbil-dung 19 gezeigt. Diese Sequenz ist plausibel, konsi-stent mit den Beobachtungen und weitgehend durch neuere Laboruntersuchungen abgedeckt.

Die chemische Theorie des Ozonabbaus führt das Ozonloch auf rein anthropogene Ursachen, nämlich

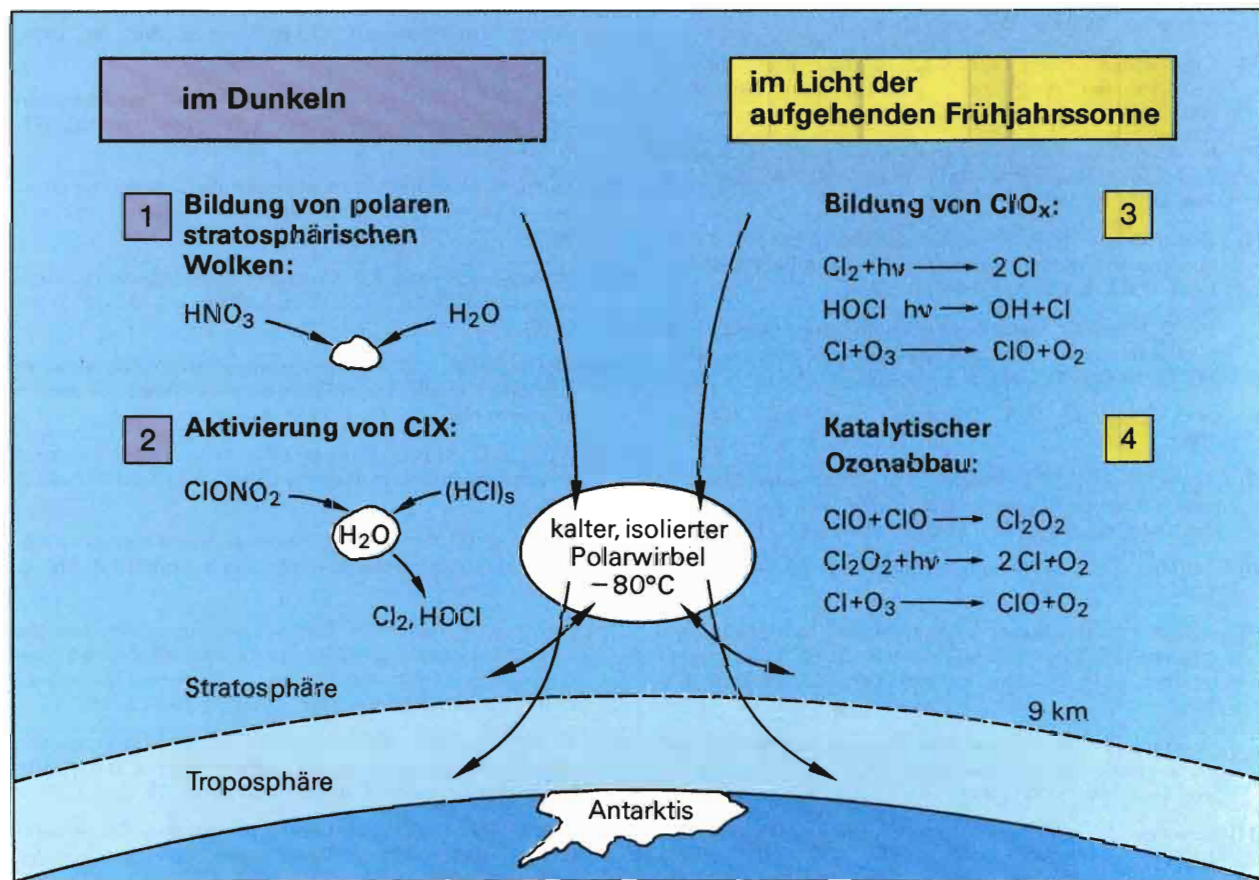


Abb. 19: Meteorologie und Chemie des Ozonlochs über der Antarktis (52).

auf eine Zunahme des Chlorgehalts zurück. Beobachtungen haben gezeigt, daß dabei dynamische Ursachen, wie zum Beispiel die zweijährige Periodizität, auch berücksichtigt werden müssen, daß aber die früher von manchen geäußerte Vermutung, die Dynamik sei die alleinige Ursache für das Ozonloch, nicht haltbar ist. Die Bedeutung der Meteorologie scheint vielmehr in der Isolierung des Polarwirbels, verbunden mit der Erzeugung der extrem tiefen Temperaturen, zu liegen.

Der dominierende Mechanismus des katalytischen Ozonabbaus in der winterlichen Polarregion ist quadratisch von der ClO-Konzentration abhängig.

Dies erklärt, warum das Ozonloch mit den Jahren sehr schnell tiefer geworden ist. Quantitative Abschätzungen lassen den Schluß zu, daß ein Chlorgehalt von etwa 2 ppbv ein Schwellwert für die Ausbildung des Ozonlochs gewesen ist. Selbst bei drastischer Reduktion von FCKW-Emissionen wird es viele Jahrzehnte dauern, bis dieser Wert wieder unterschritten wird.

Darüber hinaus ist es aus heutiger Sicht nicht geklärt, ob sich bei veränderten Spurengaskonzentrationen ein Ozonloch nicht auch bei noch kleineren ClO-Konzentrationen ausbilden kann.

#### 4. Literaturverzeichnis

- (1) Farman, J.C.; B.G. Gardiner und J.D. Shanklin: Large losses of total ozone in Antarctica reveal seasonal ClO<sub>x</sub>/NO<sub>x</sub> interaction. *Nature*, 315, 1985, S. 207
- (2) Chubachi, S.: Preliminary result of ozone observations at Syowa Station from February, 1982 to January, 1983. *Mem. Natl. Inst. Polar Res.*, 34, 1984, S. 13
- (3) Komhyr, W.D.; R.D. Grass und R.K. Leonard: Total ozone decrease at South Pole Antarctica, 1964-1985. *Geophys. Res. Lett.*, 13, 1986, S. 1248
- (4) Krueger, A.J.; M.R. Schoeberl und R.S. Stolarski: TOMS observations of total ozone in the 1986 Antarctic spring. *Geophys. Res. Lett.*, 14, 1987, S. 527
- (5) WMO: Scientific Assessment of Stratospheric Ozone: 1989, Global Ozone Research and Monitoring Project, Report 20, WMO, 1990, S. 8, Genf
- (6) NASA, Krueger, A.J., Goddard Space Flight (Center), 1989
- (7) Schoeberl, M.R.; R.S. Stolarski und A.J. Krueger: The 1988 antarctic ozone depletion: comparison with previous year depletion. *Geophys. Res. Lett.*, 16, 5, 1989, S. 377-380
- (8) Farman, J.C.: Mitteilung an die Enquete-Kommission, 1990
- (9) Angell, J.K.: Relation of Antarctic 100 mb temperature and total ozone to equatorial QBO, equatorial SST, and sunspot number, 1958-87. *Geophys. Res. Lett.*, 15, 1988, S. 915-918
- (10) Gracia, R.R. und S. Solomon: Interannual variability in Antarctic ozone and the Quasi-Biennial Oscillation, *Geophys. Res. Lett.*, 14, 1987, S. 848
- (11) Krueger, A.J.: Mitteilung an die Enquete-Kommission, 1989
- (12) Krueger, A.J.: Mitteilung an die Enquete-Kommission, 1989
- (13) Sze, N.D.; M.K.W. Ko; D.K. Weisenstein; J.M. Rodriguez; R.S. Stolarski und M.R. Schoeberl: Antarctic ozone hole: possible implications for ozone trends in the Southern Hemisphere. *J. Geophys. Res.* 94, 1989, S. 11521
- (14) Scherhag, R.: *Berl. Deut. Wetterd. (US Zone)*, 38, 1952, S. 51
- (15) Labitzke, K. und H. v. Loon: *Geowissenschaften* 8, 1990, S. 1
- (16) Larsen, S.H.H. und T. Henriksen: *Nature*, 343, 1990, S. 124
- (17) Krueger, A.J.: Mitteilung an die Enquete-Kommission, 1989
- (18) Browell, E.V. u. a.: Airborne Lidar Observations in the wintertime arctic stratosphere: Ozone. *Geophys., Res. Lett.*, 17, 4, 1990, S. 325-328
- (19) WMO 1990, S. 197
- (20) WMO: Report of the NASA/WMO ozone trends panel, Global Ozone Research and Monitoring Project, Report 18, WMO, 1989, Genf
- (21) WMO 1990, S. 209
- (22) WMO 1990, S. 210
- (23) WMO 1990, S. 212
- (24) Brasseur, G. und S. Solomon: *Aeronomy of the Middle Atmosphere*. D. Reidel Publishing Company, 1984
- (25) Prior, D.E. und B.J. Oza: *Geophys. Res. Lett.*, 5, 1978, S. 547
- (26) WMO 1990, S. 264
- (27) Bates, D.R. und M. Nicolet: The photochemistry of atmospheric water vapor, *J. Geophys. Res.*, 55, 1950, S. 301
- (28) Crutzen, P.J.: The influence of nitrogen oxides on the atmospheric ozone content. *Q.J.R. Meteorol. Soc.* 96, 1970, S. 320
- (29) Crutzen, P.J.: Ozone production rates in an oxygen-hydrogen-nitrogen oxide atmosphere. *J. Geophys. Res.*, 76, 1971, S. 7311-7327
- (30) Johnston, H.S.: Reduction of stratospheric ozone by nitrogen oxide catalysts from supersonic transport exhaust. *Science*, 173, 1971, S. 517-522
- (31) Stolarski, R.S. und R.J. Cicerone: Stratospheric chlorine: A possible sink for ozone. *Can. J. Chem.* 52, 1974, S. 1610-1615
- (32) Molina, M.J. und F.S. Rowland: Stratospheric sink for chlorofluoromethanes, chlorine atom catalyzed destruction of ozone. *Nature*, 249, 1974, S. 810-814
- (33) Wofsy, S.C.; M.B. McElroy und Y.L. Yung: The chemistry of atmospheric bromine. *Geophys. Res. Lett.*, 2, 1975; S. 215-218
- (34) Naujokat, B.: An update of observed quasi-biennial oscillation of the stratospheric winds over the tropics. *J. Atmos. Sci.* 43, 1986, S. 1873
- (35) Labitzke, K. und H. v. Loon: Associations between the 11-year solar cycle, the QBO and the atmosphere, Part I: the troposphere and stratosphere in the Northern Hemisphere in the winter. *J. Atmos. Terr. Phys.* 50, 1988, S. 197
- (36) Angell, J.K. und J. Korshover: Comparison of stratospheric trends in temperature, ozone and water vapor in the north temperate latitudes. *J. Appl. Meteorol.* 17, 1978, S. 1397
- (37) Lait, L.R.; M.R. Schoeberl und P.A. Newman: Quasi-biennial modulation of the Antarctic ozone depletion. *Geophys. Res. Lett.*, 1989
- (38) WMO 1989, S. 104

- (39) WMO 1990, S. 103
- (40) Labitzke, K. und H. von Loon: Association between the 11-year solar cycle, the QBO and the atmosphere, Part II: surface and 700 mb in the Northern Hemisphere in winter. *J. Climate*, 1, 1988, S. 905
- (41) Hofman, D.J.; J.M. Rosen; J.W. Harder und S.R. Rolf: Observations of the decay of the El Chichon stratospheric aerosol cloud in Antarctica, *Geophys.Res.Lett.* 11, 1987, S. 614
- (42) Jäger, H. und K. Wege: *J. Atm. Chem.*, 1990, im Druck
- (43) Grams, G. und G. Fiocco: *J. Geophys. Res.* 72, 1967, S. 3523
- (44) Mantis, H.T.; C.F. Zerefos; A. Bais; I. Ziomas und A. Kelesis: *Arch. Met. Geoph. Biocl. Serie, B.* 36, 1986, S. 135
- (45) Bojkov, R.D.: The 1979-1985 ozone decline in the Antarctic as reflects in ground-based observations. *Geophys. Res. Lett.*, 13, 1986, S.1236
- (46) Jäger, H. und K. Wege: 1990
- (47) Hofman, D.J. und S. Solomon: Ozone destruction through heterogeneous chemistry following the eruption of El Chichon. *J. Geophys. Res.*, 94, 1989, S. 5029
- (48) Zellner, R.: *Oxid. Communications* 9, 1986, S. 255
- (49) Zellner, R.: in: *Anthropogene Beeinflussung der Ozon-schicht DEHEMA-Fachgespräche Umweltschutz.* Dr. Behrens, J. Wiesner (Hrsg.), 1988, S. 77-100
- (50) WMO 1990, S. 122
- (51) WMO 1990, S. 27 ff
- (52) Zellner R.: *Chemie über den Wolken – Anthropogene Störung des stratosphärischen Ozons*, 1990, in Vorbereitung

## 5. Tabellenverzeichnis

- Tab. 1: Ozon-Gesamtsäulendichten (in Dobson-Einheiten) während des Monats Oktober im Zeitraum 1960 bis 1989 über der Antarktisstation Halley Bay.
- Tab. 2: Veränderungen der Gesamtozonkonzentration in den vergangenen zehn Jahren in Prozent basierend auf zonal gemittelten Dobson-Meßreihen bis 1986 beziehungsweise 1988.
- Tab. 3: Veränderungen des Gesamtozons (in Prozent pro Dekade) in verschiedenen Regionen basierend auf Dobson-Meßreihen bis 1986 beziehungsweise 1988.

## 6. Abbildungsverzeichnis

- Abb. 1: Beobachtete Trends der Ozon-Gesamtsäulendichte im Monat Oktober an den Antarktisstationen Halley Bay und Syowa sowie am Südpol seit Mitte der fünfziger Jahre und TOMS-Satellitendaten.

- Abb. 2: Satellitenaufnahme des Ozonlochs über der Antarktis am 3. Oktober 1987 und 1989.
- Abb. 3: Zeitliche Entwicklung der Oktobermittelwerte der Ozonsäulendichte über der Antarktis. Vergleich von Dobson-Messungen an der Station Halley-Bay und Satellitendaten.
- Abb. 4: Zeitlicher Verlauf der mittleren Ozongesamtsäulendichte zwischen 70 und 90°S während der Monate August bis Oktober in den Jahren 1987 bis 1989 und entsprechender Verlauf der niedrigsten Ozongesamtsäulendichte, die südlich von 30°S beobachtet wurde.
- Abb. 5: Berechnete prozentuale Änderungen der Jahresmittelwerte der Ozongesamtsäule in verschiedenen Breitenbändern der Südhemisphäre im Zeitraum 1979 bis 1994.
- Abb. 6: TOMS-Messungen der Nordpolarregion am 1. Februar 1989.
- Abb. 7: Zeitliche Entwicklung der Monatsmittelwerte der Dobson-Gesamtozonmessungen in verschiedenen Breitenbändern der Nordhemisphäre.
- Abb. 8: Veränderungen der Gesamtozonmenge in verschiedenen geographischen Regionen.
- Abb. 9: Geographische Verteilung von Veränderungen des Gesamt-ozons, gemessen mit dem Satelliteninstrument TOMS für Nordhemisphäre und Südhemisphäre.
- Abb. 10: Gemittelte Vertikalprofile des Ozons für verschiedene geographische Breiten der Nordhemisphäre im Frühjahr.
- Abb. 11: Ozon-Gesamtsäulendichte in Dobson-Einheiten als Funktion der geographischen Breite und der Jahreszeit.
- Abb. 12: Berechneter Verlauf der Strahlungsenergiedichten im UV-B-Bereich für verschiedene geographische Breiten in den Monaten Januar und Juli.
- Abb. 13: Berechnete relative Änderungen der lokalen Ozonkonzentration durch den Sonnenfleckenzyklus als Funktion der geographischen Breite am 1. September in der oberen Stratosphäre.
- Abb. 14: Zeitlicher Verlauf der Rückstreuungintensität eines LIDAR (Light Detection and Ranging)-Systems in Garmisch-Partenkirchen in den Jahren 1976 bis 1987.
- Abb. 15: Atmosphärisch-chemischer Zyklus von  $\text{ClO}_x$ .
- Abb. 16: Jahresverlauf der Temperaturen in 14 km Höhe über der britische Antarktisstation Halley Bay im Zeitraum 1957 bis 1975.
- Abb. 17: Satellitenbeobachtungen der Häufigkeitsverteilung von polaren stratosphärischen Wolken (PSC's) über der Antarktis und Arktis in den Jahren 1984 bis 1988 in verschiedenen Höhen.
- Abb. 18: Vergleich von Ozon- und  $\text{ClO}$ -Profilen als Funktion der geographischen Breite der Südhemisphäre (63-72°S) Ende August 1987 und Mitte September 1987.
- Abb. 19: Meteorologie und Chemie des Ozonlochs über der Antarktis.

2. KAPITEL

Fluorchlorkohlenwasserstoffe (FCKW), Halone, Chlorkohlenwasserstoffe (CKW) und Ersatzstoffe

1. Wirtschaftliche und technische Situation

1.1 Produktionsverfahren

FCKW werden in einem eng verzahnten Produktionsverbund, der in die hochgradig vernetzten Stoffkreisläufe der chemischen Industrie eingegliedert ist, über

mehrere Stufen hergestellt. In Abbildung 1 sind in vereinfachter Form die Zusammenhänge der FCKW-beziehungswise H-FCKW-Herstellung dargestellt. Die Produktionskette, die zu diesen Substanzen führt, geht von dem Rohstoff Natriumchlorid (Steinsalz) aus, das in einem ersten Schritt zunächst durch Elektrolyse in Chlor, Natronlauge und Wasserstoff überführt wird.

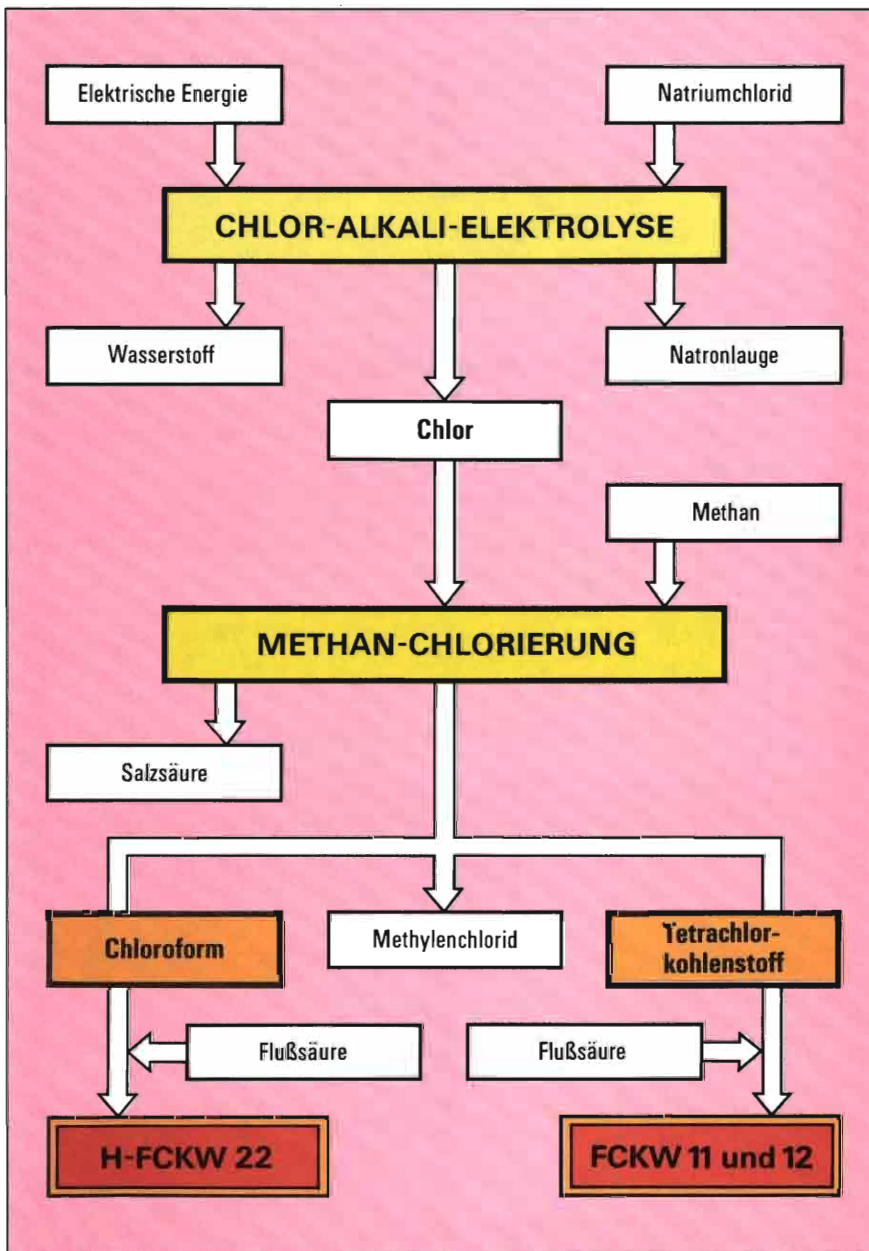


Abb. 1: Herstellungsverfahren von FCKW 11 und 12 sowie von H-FCKW 22.

Diese drei Produkte fallen dabei mengenmäßig in einem festen, nicht zu beeinflussenden Verhältnis an (Koppelproduktion), so daß beispielsweise die Orientierung an einem verringerten Chlorbedarf eine Minderproduktion bei den Koppelprodukten Natronlauge zur Folge hat. Während Natronlauge ein Schlüsselprodukt ist und in vielfältigen Anwendungsgebieten eingesetzt werden kann, ist die Verwendung von Chlor eingeschränkt. Chlor wird vor allem zur Herstellung organischer Chlorverbindungen, hauptsächlich Kunststoffe (PVC) und Lösemittel, benutzt. Die Synthese voll- und teilhalogener FCKW stellt eine weitere wichtige Senke für das in der chemischen Industrie überschüssige Chlor dar.

Neben Chlor ist Methan Haupteinsatzprodukt für die FCKW- und H-FCKW-Produktion. Aus Methan und Methanol entsteht durch Umsetzung mit Chlor unter Bildung von Salzsäure (HCl) schrittweise Methylchlorid ( $\text{CH}_3\text{Cl}$ ), Dichlormethan ( $\text{CH}_2\text{Cl}_2$ ), Chloroform ( $\text{CHCl}_3$ ) und Tetrachlorkohlenstoff ( $\text{CCl}_4$ ). Des Weiteren fällt  $\text{CCl}_4$  als Abfallprodukt bei verschiedenen Produktionsprozessen der Chlorchemie an. Gegenwärtig wird  $\text{CCl}_4$  nahezu ausschließlich zur Herstellung von FCKW verwendet, ansonsten müßte es als Sonderabfall entsorgt werden. Chloroform beziehungsweise Tetrachlorkohlenstoff sind die Ausgangsstoffe zur Herstellung des H-FCKW 22 beziehungsweise der beiden wichtigsten Fluorchlorkohlenwasserstoffe, des FCKW 11 und 12 (vgl. Abb. 1). Die Umstellung der Anlagen von FCKW 11 und 12 auf H-FCKW 22 ist unproblematisch, wenn die Anlagen drucktechnisch entsprechend ausgelegt wurden. In diesem Falle könnte die H-FCKW 22-Produktionsmenge – aus technischer Sicht – ohne weiteres erhöht werden. Exakte Informationen über die Produktionskapazität von H-FCKW 22 in der Bundesrepublik Deutschland beziehungsweise weltweit liegen nicht vor. Es ist jedoch davon auszugehen, daß sie in der gleichen Größenordnung wie die Summe von FCKW 11 und 12 liegt.

FCKW werden auch als Zwischenprodukte zur Herstellung hochentwickelter Kunststoffe und Spezialchemikalien für die Bereiche Elektronik, Pflanzenschutz und Medizin verwendet. Nach Angaben der Hoechst AG belastet eine drastische FCKW-Produktionsverminderung diese Arbeitsgebiete ebenfalls mit zusätzlichen Kosten. Die Industrie geht davon aus, daß eine drastische Beschränkung der FCKW-Produktion zu einer nachhaltigen Störung der Produktionsstruktur führt (1).

Eine genaue Chlorbilanzierung ist für die Abschätzung der ökologischen und toxikologischen Belastung dringend notwendig und wird von Politik, Umweltgruppen und Öffentlichkeit seit langem gefordert.

Der Deutsche Bundestag fordert deshalb erneut von der Bundesregierung die Anfertigung eines Berichtes, in dem dargestellt wird, ob und in welcher Form eine Chlorbilanz der Atmosphäre vorgelegt werden kann (2).

Einige Kommissionsmitglieder erklären darüber hinaus, daß bislang von der chemischen Industrie keine Bereitschaft bestehe, weder weltweit noch national eine entsprechende Bilanz von Chloreinsatz und Chloremissionen öffentlich zu machen. Diese Mitglie-

der weisen nachdrücklich darauf hin, daß die FCKW und H-FCKW nicht das einzige Gefährdungspotential der Chlorchemie seien. Vielmehr bestünden generell hohe Umweltrisiken und Gesundheitsgefahren bei der Herstellung, Verwendung und Entsorgung vieler Chlorprodukte. Organische Chlorverbindungen seien weltweit in Wasser, Luft und Böden verbreitet. Die Mehrzahl der Chemieprodukte werde mit Chlor als

Tabelle 1

**FCKW-Hersteller, die FCKW 11 und 12 Produktionsdaten an die Chemical Manufacturers Association (CMA) melden (3)**

1. Akzo Chemicals BV (Niederlande)
2. Allied-Signal, Inc. (USA)
  - a) Allied Canada Inc. (Kanada)
  - b) Quimobasicos, S.A. (Mexiko)
3. Atochem, S.A. (Frankreich)
  - a) Pacific Chemical Industries Pty. Ltd. (Australien)
  - b) Atochem Espana (Spanien)
  - c) Produven (Venezuela)
4. Australien Flourine Chemical Pty. Ltd. (Australien)
5. Du Pont Canada, Inc. (Kanada)
6. E.I. du Pont de Nemours & Company, Inc. (USA)
  - a) Du Pont de Nemours N.V. (Niederlande)
  - b) Ducilo S.A. (Argentinien)
  - c) Du Pont do Brasil S.A. (Brasilien)
  - d) Halocarburos S.A. (Mexiko)
7. Hoechst AG (Bundesrepublik Deutschland)
  - a) Hoechst Iberica (Spanien)
  - b) Hoechst do Brasil Quimica e Farmaceutica S.A. (Brasilien)
8. ICI Chemicals and Polymers, Ltd. (Großbritannien)
  - a) African Explosives & Chemical Industries, Ltd.
9. I.S.C. Chemicals Ltd. (Großbritannien)
10. Japan Flon Gas Association (Japan)
  - a) Asahi Glass Co., Ltd.
  - b) Daikin Industries, Ltd.
  - c) Du Pont-Mitsui Fluorochemicals Co., Ltd.
  - d) Showa-Denko, K.K.
11. Kali-Chemie Aktiengesellschaft (Bundesrepublik Deutschland)
  - a) Kali-Chemie Iberia SA (Spanien)
12. LaRoche Chemicals Inc. (früher Kaiser Aluminium and Chemical Corporation) (USA)
13. Montefluos S.p.A. (früher Montedison S.p.A.) (Italien)
14. Pennwalt Corporation (USA)
15. Racon, Inc. (Essex Chemical Corporation) (USA)
16. Société des Industries Chimiques du Nord de la Grece, S.A. (Griechenland)
17. Union Carbide Corporation (USA)

Reaktionsvermittler hergestellt. Eine große Anzahl der chlororganischen Zwischenprodukte und Arbeitsstoffe seien hoch toxisch und krebserregend, sie könnten am Arbeitsplatz sowie über die Nahrungskette und das Trinkwasser zu großen Schädigungen der menschlichen Gesundheit führen. Eine Beurteilung der Risiken der Chlorchemie erfordere die Untersuchung jedes relevanten Stoffes im Hinblick auf seine möglichen Gesundheits- und umweltschädlichen Wirkungen sowohl während des Herstellungsprozesses als auch während des Gebrauchs einschließlich der Entsorgung.

Diese Kommissionsmitglieder halten es für erforderlich, daß sich der Deutsche Bundestag in geeigneter Weise mit dem Gefährdungspotential der Chlorchemie detailliert auseinandersetze. Eine Möglichkeit, auch die Fragen der Chlorchemie intensiv zu behandeln, sei die Einsetzung einer Enquete-Kommission, die sich systematisch mit chemiepolitischen Fragen beschäftige.

## 1.2 Produktions- und Verbrauchsmengen sowie Hersteller

### 1.2.1 Fluorchlorkohlenwasserstoffe (FCKW)

#### – International

Die größten FCKW-Hersteller haben 1972 beschlossen, ein Forschungsprogramm durchzuführen, das zur Klärung der mit der Produktion und Freisetzung von FCKW zusammenhängenden Umweltfragen dienen soll. Dieses Programm wird von der Chemical Manufacturers Association (CMA) in Washington koordiniert. Im Rahmen dieses Programms wird seit 1976 eine Datensammlung erstellt. Zur Wahrung der Vertraulichkeit und zur Sicherheit des Datenschutzes werden die Einzeldaten der beteiligten Firmen einem Anwaltsbüro in Washington übergeben, das die globalen Zahlen errechnet und die Aufzeichnungen der Einzeldaten später vernichtet. Die CMA-Datenaufstellung, die jährlich fortgeschrieben wird, bezieht sich lediglich auf die Verbindungen FCKW 11 und 12 und enthält unter anderem:

- eine Liste der beteiligten Firmen (vgl. Tab. 1);
- die gesamte Produktion von FCKW 11 und 12 aller beteiligten Firmen seit dem Beginn der industriellen Produktion im Jahre 1931;
- eine Aufstellung der seit 1976 jährlich verkauften Mengen von FCKW 11 und 12 nach Anwendungsbereichen.

Die wichtigsten Ergebnisse der CMA-Statistik, die jedoch nicht die gesamte Weltproduktion erfaßt, sind in Abbildung 2 zusammengefaßt. Sie zeigt die seit 1960 produzierten FCKW 11- und 12-Mengen sowie die Verbrauchsentwicklung in den verschiedenen Anwendungsbereichen seit 1976.

Extreme Unterschiede werden bei Gegenüberstellung der FCKW 11- und 12-Verkaufsmengen in den beiden Hemisphären deutlich. Während in der nördlichen Hemisphäre im Zeitraum von 1931 bis 1988 7,1 Millionen Tonnen FCKW 11 beziehungsweise 9,3 Mil-

lionen Tonnen FCKW 12 verkauft wurden, betrug die kumulierte Verkaufsmenge in der südlichen Hemisphäre lediglich 0,3 Millionen Tonnen FCKW 11 beziehungsweise 0,5 Millionen Tonnen FCKW 12 (vgl. Abb. 3).

Über die Produktions- und Verbrauchsmengen in Ländern Osteuropas, der Sowjetunion und der Dritten Welt ist nur sehr begrenztes Zahlenmaterial verfügbar. Angaben hierüber werden von der CMA-Statistik lediglich für den Zeitraum von 1968 bis 1975 gegeben. Danach wurden die Schätzungen wegen Ungenauigkeit eingestellt.

#### – In der EG

Die europäischen FCKW- und Halonhersteller melden einem Unternehmensbüro in London die Produktionsmenge der fünf im Montrealer Protokoll geregelten vollhalogenierten FCKW, die Importmenge von Nicht-EG-Staaten, die Verkaufszahlen innerhalb der EG sowie die Exporte in Nicht-EG-Staaten. In Abbildung 4 ist die Produktionsentwicklung dieser Verbindungen für den Zeitraum 1987 bis 1989 und in Tabelle 2 die Produktions-, Import- und Exportmenge im Jahr 1989 dargestellt.

#### – Bundesrepublik Deutschland

Trotz starker Bemühungen der Öffentlichkeit und der Politik weigert sich die chemische Industrie, die genauen nationalen Produktions- und Verbrauchszahlen der FCKW, Halone sowie anderer ozonrelevanter Substanzen in öffentlich überprüfbarer Weise bekannt zu geben. Diese Verbindungen werden lediglich von zwei beziehungsweise einem Hersteller in industriellem Umfang produziert; statistische Daten müssen daher aus Geheimhaltungsgründen nicht veröffentlicht werden.

Die beiden einzigen bundesdeutschen Hersteller, Hoechst AG und Kali-Chemie, erklärten im Jahr 1989, daß sie die Produktion vollhalogener FCKW bis 1995 weltweit vollständig einstellen würden. Über die Verwendung des durch die Einstellung der Produktion vollhalogener FCKW nicht mehr benötigten Chlors und Tetrachlorkohlenstoffs aus Koppelproduktionsprozessen liegen derzeit keine Informationen vor.

Für 1986, dem Basisjahr für die im Montrealer Protokoll und im Bundestagsbeschluß festgelegten Reduktionsquoten der Produktionsmengen, liegen noch immer keine exakten, überprüfbaren und aufgeschlüsselten Produktionszahlen vor. Nach der EG-Verordnung zur Umsetzung des Montrealer Protokolls sind die europäischen Hersteller lediglich verpflichtet, die aktuellen Produktionszahlen den nationalen Behörden sowie der EG mitzuteilen, die diese aber nur zusammengefaßt veröffentlichen. Der Verband der Chemischen Industrie (VCI) gibt für die Gesamtproduktion der im Montrealer Protokoll geregelten FCKW in der Bundesrepublik folgende Zahlen an:

1986	112 000 Tonnen
1987	113 000 Tonnen
1988	108 000 Tonnen
1989	95 000 Tonnen

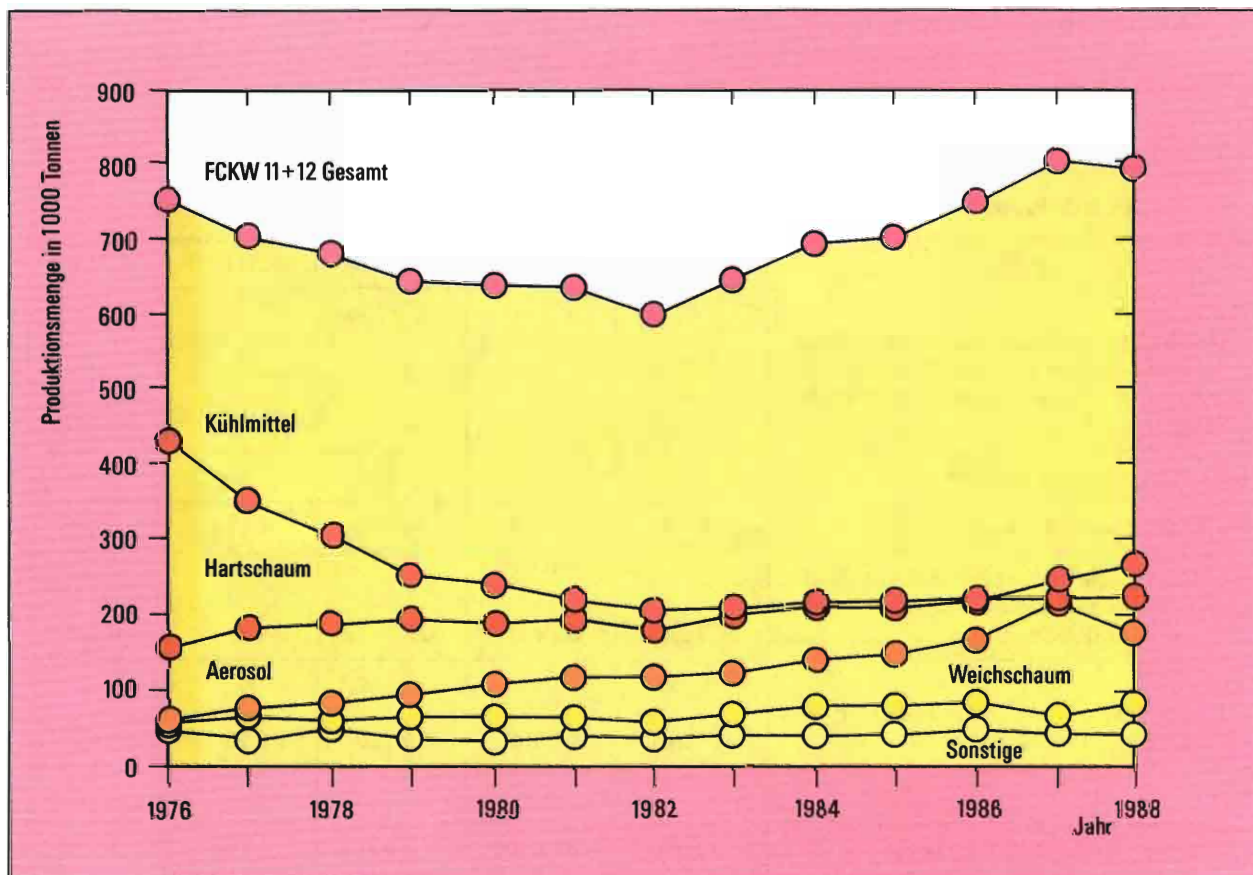
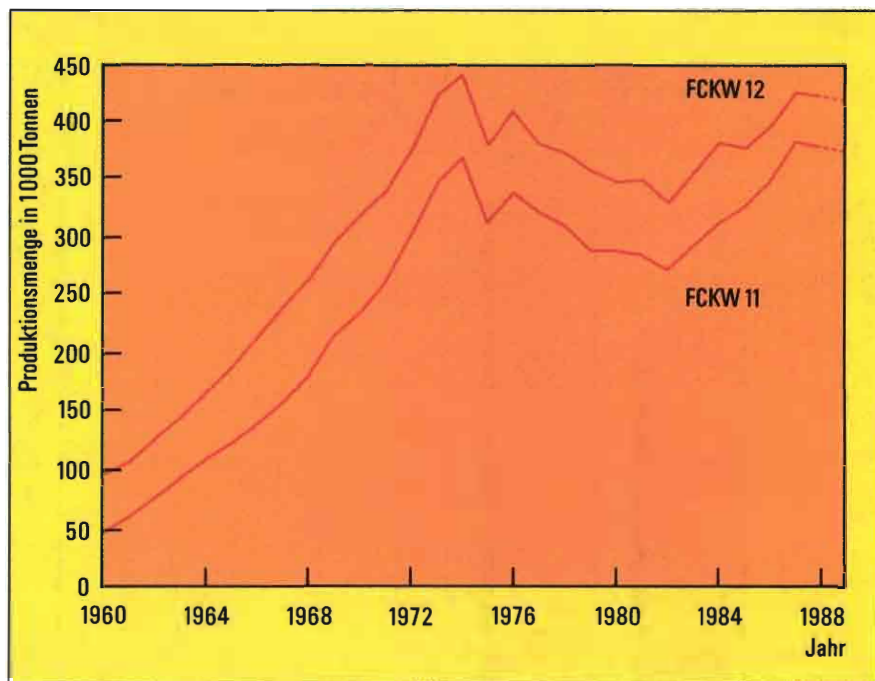


Abb. 2: Produktionsmenge von FCKW 11 und 12 im Zeitraum 1960 bis 1988 (a); Summe der Produktionsmenge von FCKW 11 und 12 in den verschiedenen Anwendungsbereichen im Zeitraum 1976 bis 1988 und Aufteilung auf die verschiedenen Anwendungsbereiche (b) (4).

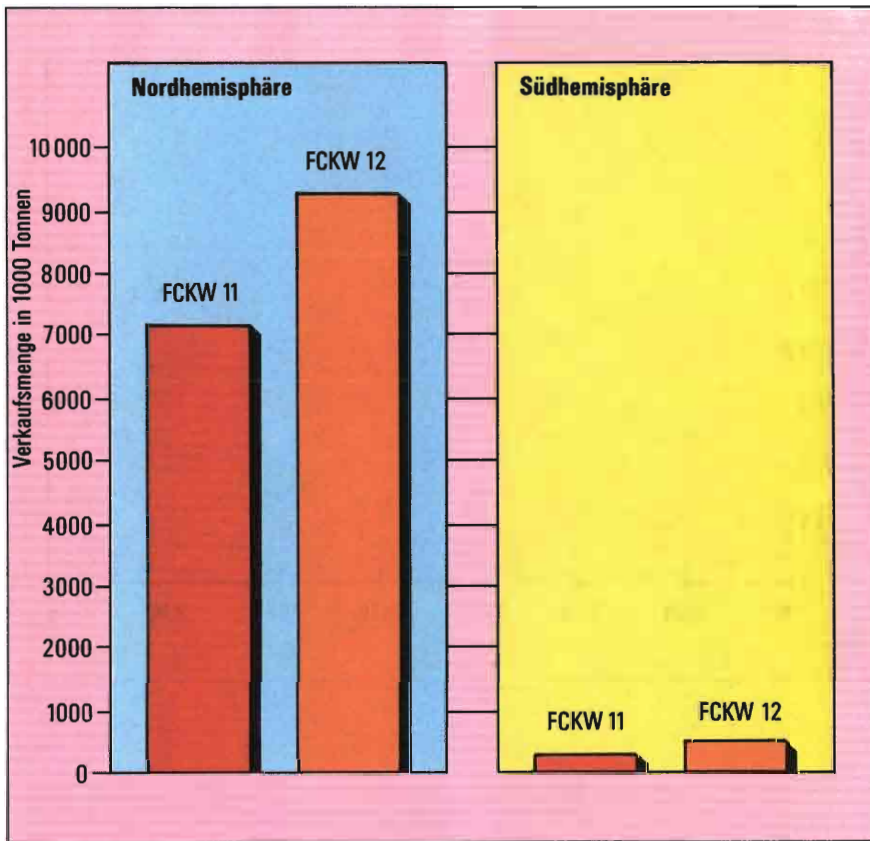


Abb. 3: FCKW 11- und 12-Verkaufsmenge im Zeitraum 1931 bis 1988 in der Nord- und Südhemisphäre (5).

Tabelle 2

**FCKW-Produktions-, Import- und Exportmenge im Jahr 1989 in der EG (in Tonnen)**

FCKW	11	12	113	114	115
Produktion (tatsächliche Produktion außer Import, Verkauf zwischen EG-FCKW-Produzenten und Zwischenproduktherstellung) .....	165 087	124 073	68 040	6 346	8 944
Importe von Nicht-EG-Staaten .....	—	46	387	—	1 167
Verkauf innerhalb der EG .....	108 507	71 131	44 578	4 123	3 478
Gesamtexporte in Länder außerhalb der EG (inklusive Verkauf zwischen Nicht- EG-FCKW-Produzenten) .....	53 201	53 467	22 341	1 899	6 559
davon: Gesamlexport in Vertragsstaaten des Montrealer Protokolls .....	17 271	17 568	15 720	1 194	5 446
bzw. Gesamlexport in Nicht-Vertragsstaaten des Montrealer Protokolls .....	35 930	35 899	6 621	705	1 113
Bestände am 1. Januar 1989 .....	6 865	8 453	7 201	807	766
Bestände am 31. Dezember 1989 .....	10 333	8 127	8 799	1 135	849



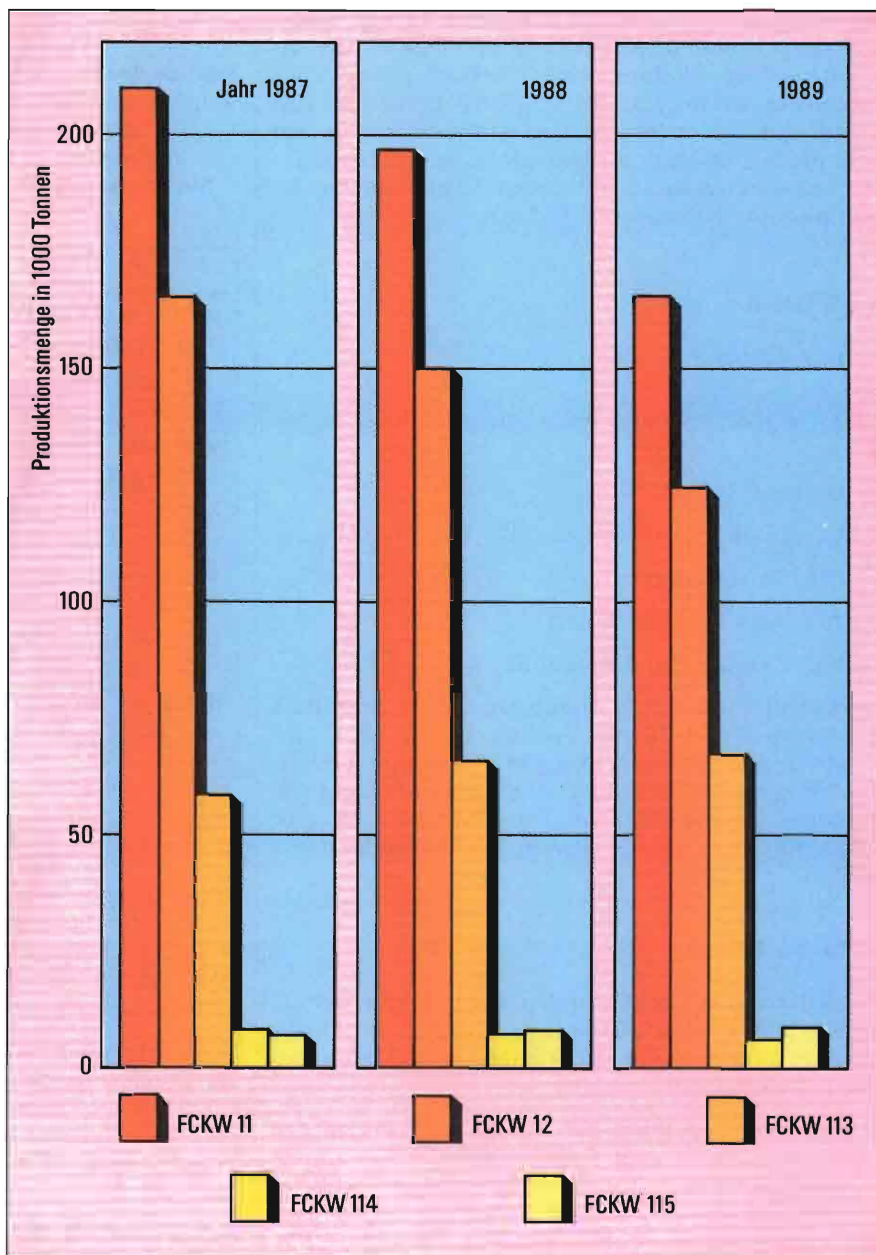


Abb. 4: EG-Produktionsmengen der Verbindungen FCKW 11, 12, 113, 114 und 115 in den Jahren 1987, 1988 und 1989.

Nach Angaben des VCI wurden 1986 59 000 Tonnen FCKW im Inland verkauft und 75 000 bis 77 000 Tonnen verbraucht.

Diese Daten sind jedoch nicht kontrollierbar und werden daher in Öffentlichkeit und Politik sehr kritisch betrachtet. Vor allem aufgrund unterschiedlicher Abschätzungen im Lösemittelbereich wird der Gesamtverbrauch in der Bundesrepublik Deutschland 1986 auf bis zu 100 000 Tonnen geschätzt (6).

Obwohl es für Maßnahmen zur FCKW-Reduzierung notwendig ist zu wissen, wie sich die verbrauchten FCKW-Mengen auf die verschiedenen Anwendungsbereiche verteilen, werden von der Industrie keine exakten Daten zur Verfügung gestellt; es liegen lediglich Abschätzungen vor.

Tabelle 3

**Verbrauch vollhalogenerter FCKW  
in der Bundesrepublik im Jahr 1986 (7)**

Einsatzgebiet	Verbrauch 1986
Lösemittel . . . . .	15 000 bis 46 000 Tonnen
Kunststoff- verschäumung . . . . .	24 000 Tonnen
Kältemittel . . . . .	4 000 Tonnen
Aerosole . . . . .	26 000 Tonnen
Gesamt . . . . .	69 000 bis 100 000 Tonnen *)

\*) Hinzu kommen 3 000 Tonnen H-FCKW 22, die nicht im Montrealer Protokoll geregelt sind.

Innerhalb der verschiedenen Staaten unterscheidet sich der prozentuale Anteil dieser vier FCKW-Anwendungsbereiche. Während beispielsweise in den Vereinigten Staaten der Einsatz von FCKW in mobilen Klimaanlage, in erster Linie in Kraftfahrzeugen, ein sehr großer Anwendungsbereich ist, spielt dieser Bereich in den übrigen Ländern mit Ausnahme von Japan nur eine untergeordnete Rolle.

## 1.2.2 Halone

### — International

Weltweit gibt es nur wenige große Halon-Hersteller:

- Du Pont, USA,
- Great Lakes Corporation, USA,
- ICI, Großbritannien,
- Atochem, Frankreich und
- Kali-Chemie, Bundesrepublik.

Insgesamt wurden von diesen Firmen im Jahr 1986 zusammen rund 10 000 Tonnen Halon 1301 und 14 000 Tonnen Halon 1211 sowie 1 000 Tonnen Halon 2402 hergestellt; dies entspricht etwa 80 Prozent des globalen Halonverbrauchs. Die CMA-Statistik gibt keine Angaben über weltweite Halon-Produktionszahlen.

### — In der EG

Nach der Statistik der Hersteller wurde 1989 in der EG eine FCKW 11 äquivalente Halon-Menge von 71 059 Tonnen produziert; 46 729 Tonnen wurden innerhalb der EG verbraucht (vgl. Tab. 4)

Die Gesamtproduktion der Halone gibt wegen des sehr unterschiedlichen Ozonabbaupotentials dieser Substanzen keinen Aufschluß über die tatsächliche Gefährdung der Ozonschicht. Daher werden die Daten — und zwar sowohl für Halone als auch für FCKW — in „gewichtete Tonnen“ umgerechnet, das heißt die jeweiligen Produktionsmengen werden mit dem im Montrealer Protokoll genormten Ozonabbaupotential multipliziert und entsprechen dann einer äquivalenten FCKW-Menge mit dem Ozonabbaupotential 1. Die Verpflichtungen des Montrealer Protokolls und der Verordnung EWG Nr. 3322/88 beziehen sich ausschließlich auf in „gewichteten Tonnen“ angegebene Mengen.

In den vergangenen 15 Jahren ist der Haloneinsatz zur Brandbekämpfung drastisch gestiegen. Die Abbildungen 5 und 6, die die Entwicklung des jährlichen Halonverbrauches beziehungsweise des kumulierten Haloninventars in der EG darstellen, belegen dies eindrucksvoll.

### — Bundesrepublik Deutschland

Trotz wiederholter Forderungen der Öffentlichkeit und der Politik gibt der einzige bundesdeutsche Halonhersteller, die Kali-Chemie, Tochtergesellschaft

Tabelle 4

**Summe der Halon 1211, 1301 und 2402 Produktions-, Import- und Exportmenge im Jahr 1989 in der EG. Die Daten werden in FCKW 11 Äquivalenten angegeben, d. h. die Menge des jeweiligen Stoffes ist mit dem entsprechenden ODP\*)-Wert multipliziert.**

	Tonnen ★ ODP
Produktion von Halon 1211, 1301 und 2402 in EG-Staaten . . . . .	71 059
Importe außerhalb der EG von Halon 1211, 1301 und 2402 . . .	4 805,4
Verkäufe innerhalb der EG von Halon 1211, 1301 und 2402 . . .	46 729,4
Exporte außerhalb der EG von Halon 1211, 1301 und 2402 . . .	25 931,4
Exporte in Vertragsstaaten des Montrealer Abkommens . . . . .	11 756,5
Exporte in Nicht-Vertragsstaaten des Montrealer Protokolls . . . . .	14 174,9
Bestände am 1. Januar 1989 . . . .	7 011,7
Bestände am 31. Dezember 1989 .	10 215,3

\*) ODP:Ozone Depletion Potential (vgl. Nr. 2.1)

des belgischen Unternehmens Solvay AG, die aufgeschlüsselten Produktions- und Verbrauchsmengen in öffentlich überprüfbarer Weise nicht bekannt. Ebenfalls nicht öffentlich bekannt sind die Halon-Verbrauchsmengen im militärischen Bereich.

Nach Schätzung des Umweltbundesamtes wurden in der Bundesrepublik Deutschland im Jahr 1986 etwa 4 000 Tonnen Halone produziert. Die Fraunhofer-Gesellschaft (10) gibt für das Jahr 1986 folgende Verbrauchsmengen für die Bundesrepublik Deutschland an:

Halon 1301: 1 000 Tonnen  
Halon 1211: 1 000 Tonnen

Die Verwendung von Halon 1301 in Schiffen und Halon 1211 in Flugzeugen wurde in dieser Schätzung nicht berücksichtigt. Nach Einschätzung des Umweltbundesamtes wurde jedoch in der FhG-Studie die für Probeflutungen eingesetzte Halonmenge zu hoch angegeben.

Nach Angaben der Kali-Chemie wurden 1989 in der Bundesrepublik Deutschland 16 735 gewichtete Tonnen \*) Halone produziert. Hiervon wurden 4 673 gewichtete Tonnen im Inland verkauft und 12 062 gewichtete Tonnen exportiert.

Die Schätzungen des Halonverbrauches in der EG, der Bundesrepublik Deutschland, der USA sowie in den übrigen Ländern sind in Tabelle 5 zusammengefaßt.

\*) „gewichtete Tonnen“: die jeweiligen Mengen sind mit dem Ozonerstörungspotential (ODP-Wert) multipliziert und entsprechen dann einer äquivalenten FCKW-Menge mit dem ODP-Wert 1.

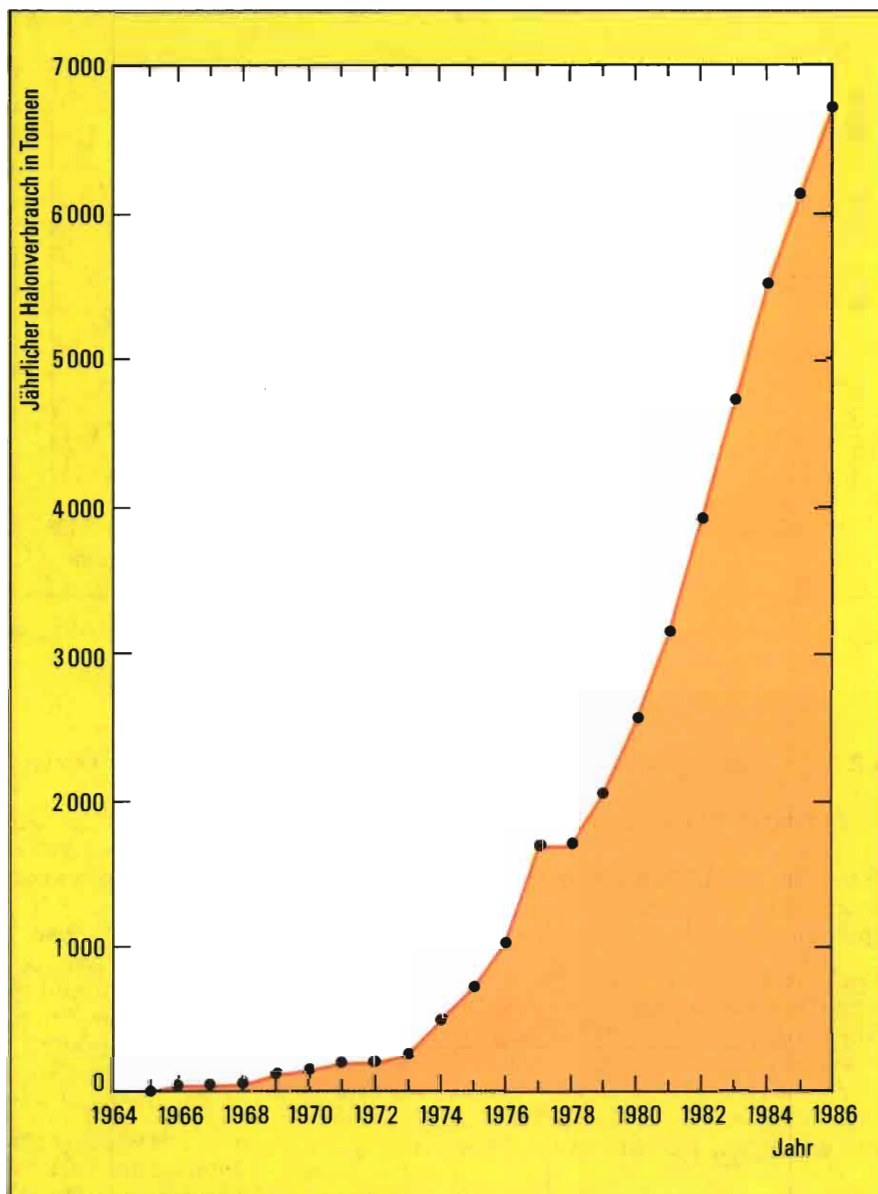


Abb. 5: Entwicklung des jährlichen Halonverbrauchs in der EG (8).

Tabelle 5

**Weltweiter Halonverbrauch im Jahre 1986 (11)**

Staaten	Halonmenge (in Tonnen)
Europäische Gemeinschaften . . . . .	6 700
(davon Bundesrepublik Deutschland) . . . . .	ca. 1 300– 2 000
USA . . . . .	8 000–10 000
Übrige Länder . . . . .	8 000–10 000
Welt . . . . .	ca. 22 700–26 700

Über anthropogene Quellen weiterer bromhaltiger Verbindungen und Halone liegen kaum Angaben vor. In den osteuropäischen Staaten und der Sowjetunion wird Halon 1011 (geschätzter ODP-Wert 0,1 bis 0,2), das in der Bundesrepublik Deutschland wegen seiner Toxizität nicht zugelassen ist, in Handfeuerlöschgeräten eingesetzt.

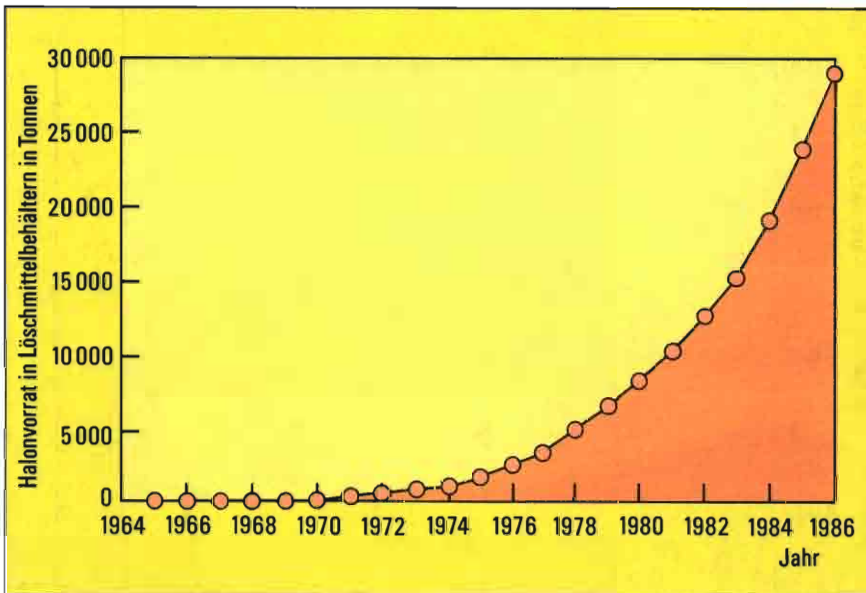


Abb. 6: Entwicklung des kumulierten Haloninventars in Feuerlöschanlagen und -geräten in der EG (9).

### 1.2.3 Chlorkohlenwasserstoffe (CKW)

#### – Bundesrepublik Deutschland

Hersteller von CKW-Lösungsmitteln sind in der Bundesrepublik Deutschland die Firmen Dow Chemical, Hoechst AG, Hüls AG und Wacker-Chemie GmbH.

Trichlorethan wird in der Bundesrepublik nur von Dow Chemical produziert. Genaue Produktionszahlen werden daher aus Geheimhaltungsgründen nicht veröffentlicht. Von den drei deutschen Herstellern Dow Chemical, Hoechst AG und Hüls AG wurden 1987 180 000 Tonnen Tetrachlorkohlenstoff produziert, von denen 102 000 Tonnen exportiert wurden.

## 2. Wirkung in der Atmosphäre

FCKW und Halone sind in der Troposphäre sehr reaktionsträge und langlebig. Der wichtigste Abbaumechanismus für diese Substanz ist die Photolyse in der Stratosphäre durch UV-Sonnenstrahlung mit Wellenlängen zwischen 190 und 220 nm.

Langlebige Chlor- und Bromverbindungen sind von großer Bedeutung für die Atmosphäre, da sie sowohl die Quelle der Chlor- und Bromradikale in der Stratosphäre sind, die wiederum in katalytischen Reaktionen die Ozonzerstörung verursachen (vgl. 1. Kap. Nr. 2.3), als auch im infraroten Wellenlängenbereich des Spektrums Strahlung absorbieren und deshalb zu einer Verstärkung des Treibhauseffektes führen (12). FKW enthalten zwar keine Chlor- und Bromatome und haben daher keine Auswirkungen auf die Ozonschicht, jedoch tragen sie zu einer Verstärkung des Treibhauseffektes bei.

Es ist hervorzuheben, daß bei der Suche nach geeigneten Ersatzstoffen sowohl deren Ozon- als auch deren Klimawirksamkeit berücksichtigt werden muß.

### 2.1 Ozonzerstörungspotential, ODP-Wert

Als Maß für die Ozonwirksamkeit voll- und teilhalogenerter Substanzen, die sich wegen der unterschiedlichen Reaktivität dieser Stoffe in der Troposphäre unterscheidet, wird das Ozonzerstörungspotential (im englischen: Ozone Depletion Potential, ODP) angegeben (vgl. 3. Kapitel). Dieser ODP-Wert wird mit Hilfe ein- und zweidimensionaler (1-D- und 2-D-) Modelle berechnet. FCKW 11 wurde dabei als Bezugsgröße gewählt und mit dem Wert 1 festgesetzt. Die Ergebnisse von ODP-Berechnungsmodellen sind in Tabelle 6 dargestellt.

Der tatsächliche Einfluß auf die Stratosphäre ist das Produkt aus ODP-Wert und Emissionsmenge. Teilhalogenierte Stoffe, die einen niedrigen ODP-Wert haben, können bei hohen Zuwachsraten die FCKW-Reduktionserfolge gefährden.

Teilhalogenierte Verbindungen reagieren größtenteils bereits in der Troposphäre mit Hydroxyl(OH)-Radikalen; die Folgeprodukte werden anschließend zu einem großen Teil durch trockene oder nasse Deposition aus der Atmosphäre entfernt. Daher haben diese Substanzen im Vergleich zu vollhalogenierten FCKW eine deutlich geringere Verweilzeit und nur etwa ein bis zehn Prozent von deren Ozonzerstörungs- und Treibhauspotential.

Für Halone wird neben dem ODP-Wert auch das Bromozonzerstörungspotential berechnet. Bezugsgröße ist hier Halon 1301, das die längste Lebenszeit und den höchsten ODP-Wert hat (vgl. Tab. 7).

Die Bromatome der Halone zerstören das Ozon in der Stratosphäre im Vergleich zu den Chloratomen wirksamer und haben daher ein um den Faktor drei bis zehn höheres Ozonzerstörungspotential als vollhalogenierte FCKW. Hinzu kommt, daß die gekoppelte  $\text{ClO}_x\text{-BrO}_x$ -Katalyse in besonders hohem Maße Ozon abbaut (vgl. 1. Kap. Nr. 2.3).

Tabelle 6

**Verweilzeit, Emissionsmenge sowie Ergebnisse von Ozonzerstörungspotential (ODP)-  
und Treibhauspotential (GWP)-Berechnungsmodellen (vgl. Nr. 2.2) für FCKW, H-FCKW  
und der Verbindungen Tetrachlorkohlenstoff und Methylchloroform  
bezogen auf die Referenzverbindung FCKW 11**

Verbindungen	Verweilzeit **) (Jahre)	Emissionsmenge **) 10 <sup>6</sup> t/Jahr	ODP-Wert *)		GWP-Wert *)	
			1-D-Modell	2-D-Modell	AER	Du Pont
FCKW 11 .....	60	0,3	1,0	1,0	1,0	1,0
FCKW 12 .....	120	0,4	0,9 – 1,0	0,9	3,4	2,8
FCKW 113 .....	90	0,15	0,8 – 0,9	0,8 – 0,9	1,4	1,4
FCKW 114 .....	200	0,015	0,6 – 0,8	0,6 – 0,8	4,1	3,7
FCKW 115 .....	400	0,005	0,4 – 0,5	0,3 – 0,4	7,5	7,6
H-FCKW 22 .....	15,3	0,1	0,04 – 0,05	0,04 – 0,06	0,37	0,34
H-FCKW 123 .....	1,6	0,1	0,013–0,016	0,013–0,022	0,020	0,017
H-FCKW 124 .....	6,6		0,016–0,018	0,018–0,024	0,10	0,092
FKW 125 .....	28,1		0	0	0,65	0,51
FKW 134 a .....	15,5		0	0	0,29	0,25
H-FCKW 141 b .....	7,8		0,07 – 0,08	0,09 – 0,11	0,097	0,087
H-FCKW 142 b .....	19,1		0,05 – 0,06	0,05 – 0,06	0,39	0,34
FKW 143 a .....	41		0	0	0,76	0,72
FKW 152 a .....	1,7		0	0	0,033	0,026
CCl <sub>4</sub> .....	50	0,09	1,0 – 1,2	1,0 – 1,2	0,34	0,35
CH <sub>3</sub> CCl <sub>3</sub> .....	6,3	0,81	0,10 – 0,12	0,13 – 0,16	0,022	0,026

\*) (13)

\*\*) (14)

Tabelle 7

**Ozonzerstörungspotential (ODP-Wert)  
und Bromozonzerstörungspotential (BODP-Wert)  
für verschiedene Halone, berechnet nach dem 1-D-  
und 2-D-Modell (15)**

Verbindungen	ODP		BODP	
	1-D	2-D	1-D	2-D
Halon-1301 .....	13,2	7,8	1,0	1,0
Halon-1211 .....	2,2	3,0	0,17	0,38
Halon-1202 .....	0,3		0,02	
Halon-2402 .....	6,2	5,0	0,5	0,64

Die Ergebnisse der 1-D- und 2-D-Modelle unterscheiden sich nur sehr geringfügig. Trotzdem existieren bei der Berechnung der ODP-Werte noch starke Unsicherheiten. Zum einen werden die chemischen und dynamischen Prozesse, die das Ozonloch über der Antarktis verursachen, nicht in die Modellberechnungen miteinbezogen (vgl. Kap. 3). Zum anderen sind Kalkulationen über die Verweilzeit und Konzentrationen der Hydroxyl(OH)-Radikale, die von entscheidender Bedeutung sind, unsicher. Darüber hinaus

muß beachtet werden, daß sich der ODP-Wert nur auf die Verringerung der Gesamtozonkonzentration bezieht. Informationen über mögliche vertikale Ozonumverteilungen, die ebenfalls großen Einfluß auf die Vorgänge in der Atmosphäre haben, kann der ODP-Wert nicht geben.

Die Berechnung des ODP-Wertes gibt dessen Ozonzerstörungspotential im Gleichgewichtszustand an, der sich nach vielen Jahrzehnten einstellt. Nicht berücksichtigt wird jedoch die zeitliche Entwicklung der Ozonzerstörung.

Die in Abbildung 7 dargestellten Ergebnisse berücksichtigen die Zeitabhängigkeit der Ozonzerstörung, die von der Verweilzeit der Substanz in der Atmosphäre sowie der Transportgeschwindigkeit, mit der das Gas in die Region der Ozonzerstörung gelangt, beeinflusst wird. Je kürzer die Verweilzeit (vgl. Abschnitt C, 1. Kapitel Nr. 1) einer Verbindung in der Stratosphäre ist, desto früher erreicht die relative Ozonzerstörung ihren höchsten Wert beziehungsweise desto früher klingt sie ab.

Beispielsweise haben CH<sub>3</sub>CCl<sub>3</sub>, H-FCKW 141 b und 123 einige Jahre nach ihrer Emission hohe relative Ozonzerstörungswerte, die jedoch im Vergleich zu längerlebigen Substanzen schneller absinken. Anders die Verbindungen H-FCKW 22, 124 und 142 b, deren relative Ozonzerstörung zunächst geringer ist und im Laufe der Jahre ansteigt.

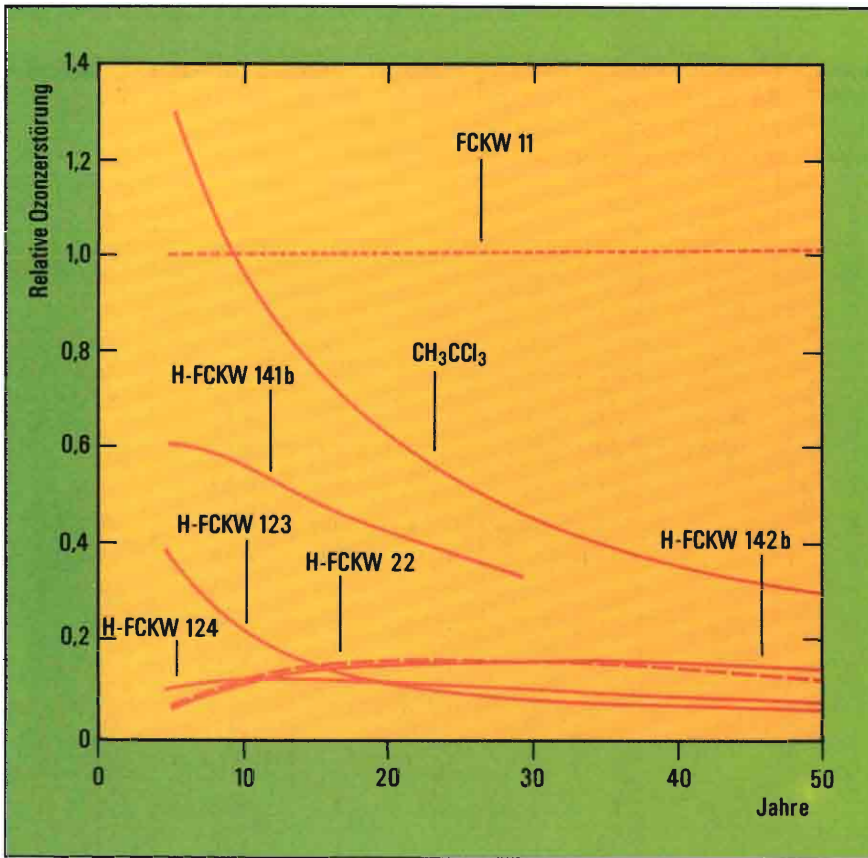


Abb. 7: Relative Ozonerstörung durch teilhalogenierte Verbindungen in Abhängigkeit der Zeit (16).

Tabelle 8

**Maximales emissionsbezogenes Chlorbelastungspotential (CLP-Wert) für verschiedene FCKW, H-FCKW, FKW und andere Verbindungen (17)**

Verbindungen	Lebensdauer (in Jahren)	CLP
FCKW 11 .....	60,0	1,0
FCKW 12 .....	120,0	1,5
FCKW 113 .....	90,0	1,11
FCKW 114 .....	200,0	1,8
FCKW 115 .....	400,0	2,0
H-FCKW 22 .....	15,3	0,14
H-FCKW 123 .....	1,6	0,016
H-FCKW 124 .....	6,6	0,04
FKW 125 .....	28,1	0
FKW 134 a .....	15,5	0
H-FCKW 141 b .....	7,8	0,10
H-FCKW 142 b .....	19,1	0,14
FKW 143 a .....	41,0	0
FKW 152 a .....	1,7	0
CCl <sub>4</sub> .....	50,0	1,0
CH <sub>3</sub> CCl <sub>3</sub> .....	6,3	0,11
Trichlorethan .....	0,6 ± 0,2	
Tetrachlorethan .....	0,6 ± 0,2	
Dichlormethan .....	0,6 ± 0,2	

Es wird erwartet, daß aufgrund der besonderen Bedingungen innerhalb des polaren Wirbels lokal höhere ODP-Werte, als in Tabelle 6 angegeben, existieren. Eine wichtige Größe für die Abschätzung der Ozonwirksamkeit einer Verbindung ist daher auch der Chloreintrag, das sogenannte „Chlorine Loading Potential“, CLP. Dieses ist definiert durch den maximalen Chlorgehalt einer Substanz, der durch die Tropopause in die Stratosphäre transportiert wird, im Vergleich zu FCKW 11. Das Chlorbelastungspotential ist proportional zur Lebenszeit der Verbindung und zur Anzahl der Chloratome pro Molekül sowie umgekehrt proportional zum Molekulargewicht (vgl. Tab. 8).

## 2.2 Treibhauspotential, GWP-Wert

Die infraroten Absorptionsspektren voll- und teilhalogenierter FCKW außerhalb der CO<sub>2</sub>-Banden liegen im Wellenlängenbereich zwischen sieben bis dreizehn µm. Diese Gase können daher Strahlung im sogenannten „atmosphärischen Strahlungsfenster“ (vgl. Abb. 8) absorbieren und tragen zu einer Verstärkung des Treibhauseffektes bei. Wie in Abschnitt C, 1. Kapitel, Nr. 3 ausführlich dargestellt ist, sind diese ausschließlich industriell hergestellten Verbindungen zu etwa 20 Prozent an der antropogenen Verstärkung des Treibhauseffektes beteiligt.

Als Maß für die Klimawirksamkeit einer Verbindung wird das Treibhauspotential (in englisch: Global Warming Potential, GWP) angegeben (vgl. Abschnitt C, 1. Kap. Nr. 3). Die Daten werden entweder analog zu

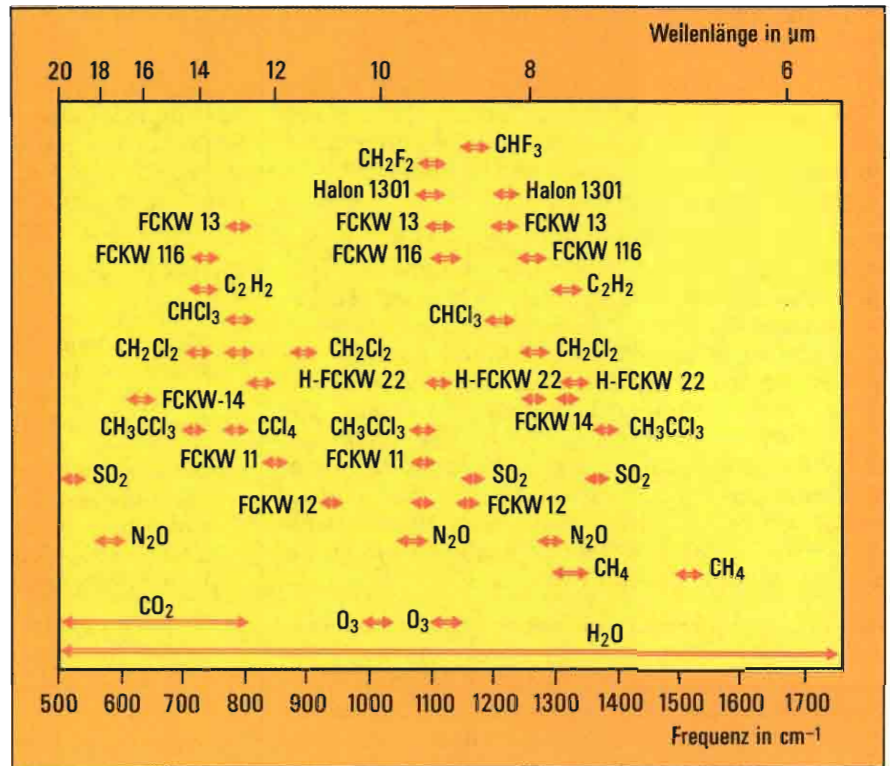


Abb. 8: Absorptionsspektren verschiedener Spurengase in der Atmosphäre (18).

Tabelle 9

**Emissionsbedingte Treibhauspotentiale (GWP-Werte), bezogen auf 1 Kilogramm Emission relativ zu CO<sub>2</sub> im Gleichgewichtszustand für verschiedene Zeithorizonte (19)**

Verbindung	Lebensdauer Jahre	GWP-Wert für Zeithorizont von		
		20 Jahren	100 Jahren	500 Jahren
CO <sub>2</sub>	120 *)	1	1	1
FCKW 11	60	4 500	3 500	1 500
FCKW 12	120	7 100	7 300	4 500
FCKW 113	90	4 500	4 200	2 100
FCKW 114	200	6 000	6 900	5 500
FCKW 115	400	5 500	6 900	7 400
Halon 1301	110	5 800	5 800	3 200
H-FCKW 22	15	4 100	1 500	510
H-FCKW 123	1,6	310	85	29
H-FCKW 124	6,6	1 500	430	150
FKW 125	28	4 700	2 500	860
FKW 134 a	16	3 200	1 200	420
H-FCKW 141 b	8	1 500	440	150
H-FCKW 142 b	19	3 700	1 600	540
FKW 143 a	41	4 500	2 900	1 000
FKW 152 a	1,7	510	140	47
CCl <sub>4</sub>	50	1 900	1 300	460
CH <sub>3</sub> CCl <sub>3</sub>	6	350	100	34

\*) Bestimmung der CO<sub>2</sub>-Verweilzeit vgl. Abschnitt C, 1. Kapitel

den ODP-Werten auf die Verbindung FCKW 11 oder auf das wichtigste Treibhausgas CO<sub>2</sub> normiert.

Die GWP-Werte für verschiedene FCKW, H-FCKW, FKW und die Verbindungen Tetrachlorkohlenstoff und Methylchloroform bezogen auf die Referenzverbindung FCKW 11 sind zusammen mit den ODP-Werten in Tabelle 6 angegeben.

Der GWP-Wert beschreibt die relative Änderung der Strahlungsbilanz im Gleichgewichtszustand, das heißt, eine Zeitabhängigkeit wird nicht erfaßt. Für die Beurteilung der Kurzzeitauswirkungen und der Maßnahmen, die in unmittelbarer Zukunft Wirkung zeigen, ist die Zeitabhängigkeit der Treibhauspotentiale jedoch von Bedeutung. In Tabelle 9 ist daher der GWP-Wert der Gase relativ zu CO<sub>2</sub> innerhalb einer 20-Jahres-, einer 100-Jahres- und einer 500-Jahresperiode angegeben. Beispielsweise ist das Treibhauspotential von FCKW 11 innerhalb einer 20-Jahres-Periode um den Faktor 4 500 und nach 500 Jahren um den Faktor 1 500 höher als das von CO<sub>2</sub>.

Neben diesen emissionsbezogenen Treibhauspotentialen werden auch konzentrationsbezogene Treibhauspotentiale berechnet. Sie geben an, um welchen Faktor die Klimawirksamkeit eines zusätzlichen Moleküls in der Atmosphäre relativ zur Referenzsubstanz

CO<sub>2</sub> erhöht ist. Diese Werte sind in Tabelle 10 angegeben.

In Tabelle 11 wird die Erhöhung der Oberflächentemperatur angegeben, die sich einstellt, wenn die Konzentration des jeweiligen Stoffes von 0 auf 1 ppb ansteigt. Zur Abschätzung der Bandbreite sind die Ergebnisse von zwei Modellen angegeben, die sich etwa um den Faktor 2 unterscheiden.

Zusammenfassend läßt sich feststellen:

- vollhalogenierte FCKW haben sowohl hohe ODP- als auch hohe GWP-Werte. Diese Stoffe sind für die Ozonerstörung verantwortlich und tragen zu etwa 20 Prozent zur Verstärkung des anthropogenen Treibhauseffektes bei.
- die Bromatome der Halonverbindungen zerstören die Ozonschicht im Vergleich zu Chloratomen drei- bis zehnmal wirksamer. Die gekoppelte ClO<sub>x</sub>- BrO<sub>x</sub>-Katalyse bewirkt einen effektiven Ozonabbau (vgl. 1. Kap. Nr. 2.3).
- Teilhalogenierte Verbindungen werden zum Teil in der Troposphäre durch OH-Radikale abgebaut und haben aus diesem Grund eine geringere Verweilzeit in der Atmosphäre als vollhalogenierte Substanzen. Dies führt dazu, daß teilhalogenierte

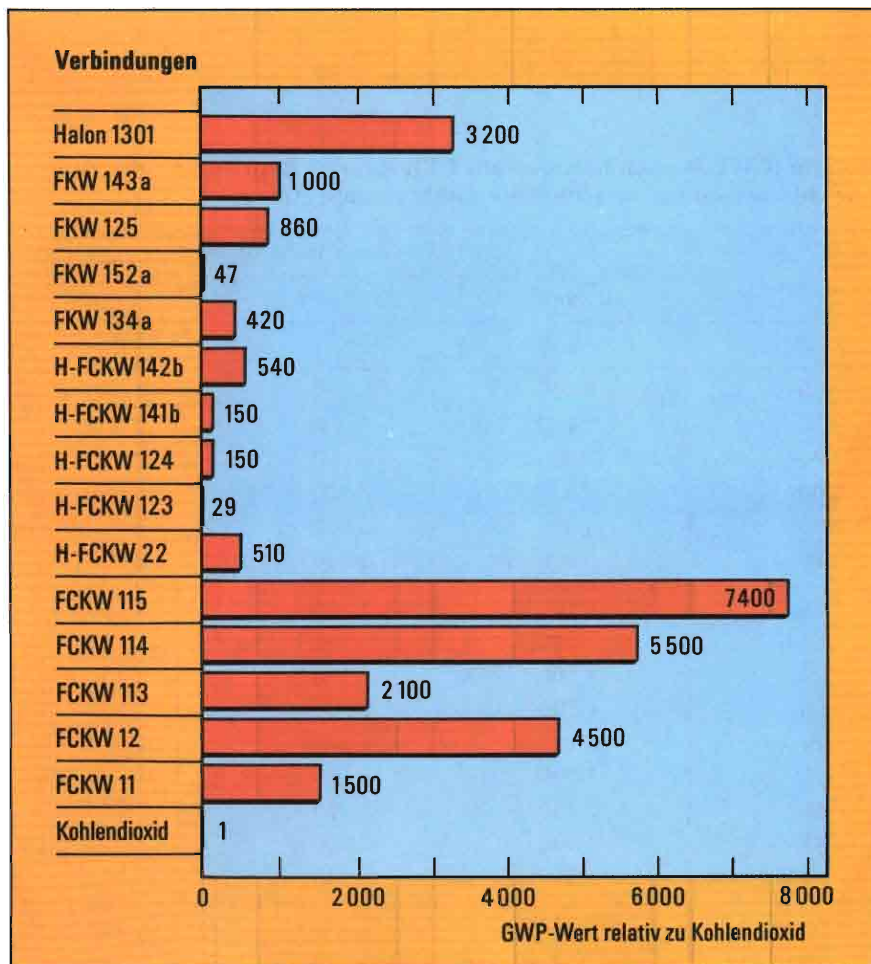


Abb. 9: GWP-Werte verschiedener FCKW, H-FCKW und FKW relativ zu CO<sub>2</sub> (21).



Tabelle 10

**Konzentrationsbezogener GWP-Wert verschiedener FCKW, H-FCKW, FKW sowie der Verbindungen Tetrachlorkohlenstoff und Methylchloroform pro Molekül (20)**

Verbindung	GWP-Wert pro Molekül
CO <sub>2</sub>	1
FCKW 11 .....	12 400
FCKW 12 .....	15 800
FCKW 113 .....	15 800
FCKW 114 .....	18 300
FCKW 115 .....	14 500
Halon 1301 .....	16 000
H-FCKW 22 .....	10 700
H-FCKW 123 .....	9 940
H-FCKW 124 .....	10 800
FKW 125 .....	13 400
FKW 134 a .....	9 570
H-FCKW 141 b .....	7 710
H-FCKW 142 b .....	10 200
FKW 143 a .....	7 830
FKW 152 a .....	6 590
CCl <sub>4</sub> .....	5 720
CH <sub>3</sub> CCl <sub>3</sub> .....	2 730

FCKW in geringerem Umfang zur Ozonzerstörung und zum Treibhauseffekt beitragen. Der tatsächliche Einfluß auf den Treibhauseffekt ist das Produkt aus GWP-Wert und Emissionsmenge. In Tabelle 6 sind daher beide Größen angegeben.

- Bei der Bewertung der Substanzen und speziell der möglichen FCKW-Ersatzstoffe müssen sowohl die Ozonzerstörungspotentiale als auch die Treibhauspotentiale berücksichtigt werden. Eine Verbindung, die zwar kein Ozonzerstörungspotential aufweist, jedoch im großen Umfang zum Treibhauseffekt beiträgt, kann aus umweltpolitischer Sicht keine Alternative zu vollhalogenierten FCKW darstellen. Der Einsatz der Substitute führt in vielen Anwendungsbereichen entweder zu einer Energieeinsparung oder zu einem Energieaufwand. Diese Effekte müssen in die Bilanzierung der Auswirkungen möglicher Ersatzstoffe ebenfalls einbezogen werden.

### 2.3 Konzentrationstrends

Die Konzentration halogener Kohlenwasserstoffe ist in den letzten Jahrzehnten durch menschliche Aktivitäten stark gestiegen. Die globalen Konzentrationstrends werden durch Messungen an Reinluftstationen festgestellt, die weit entfernt von den Emissionsquellen liegen. Dies ist möglich, weil die Verweilzeit dieser Verbindungen deutlich länger ist als die globale Zirkulationszeit der Atmosphäre und eine homogene Durchmischung stattfinden kann. Deshalb

Tabelle 11

**Erhöhung der spezifischen Oberflächentemperatur, die aus 1 ppbv des jeweiligen Gases resultiert**

	Konzentration *) (pptv)	Berechnete Erwärmung **) (Kelvin pro ppbv)	
		AER	Du Pont
FCKW 11 .....	240	0,135	0,054
FCKW 12 .....	415	0,202	0,102
FCKW 113 .....	45	0,174	0,103
FCKW 114 .....	15	0,208	0,115
FCKW 115 .....	5	0,170	0,107
H-FCKW 22 .....	100	0,124	0,070
H-FCKW 123 .....		0,111	0,059
H-FCKW 124 .....		0,126	0,070
FKW 125 .....		0,160	0,078
FKW 134 a .....		0,114	0,061
H-FCKW 141 b .....		0,086	0,048
H-FCKW 142 b .....		0,120	0,066
FKW 143 a .....		0,092	0,054
FKW 152 a .....		0,076	0,038
CCl <sub>4</sub> .....	140	0,062	0,040
CH <sub>3</sub> CCl <sub>3</sub> .....	150	0,027	0,020

\*) (22)

\*\*) (23)

sind die in Abbildung 10 und Tabelle 12 angegebenen Werte global repräsentativ.

Die Emission voll- und teilhalogenerter FCKW hat dazu geführt, daß die ClX-Konzentration in der Stratosphäre mittlerweile 3 ppbv beträgt. Die natürliche Hintergrundkonzentration, die vorwiegend durch das aus Ozeanen freigesetzte Methylchlorid ( $\text{CH}_3\text{Cl}$ ) entsteht, liegt bei etwa 0,6 ppbv. Modellrechnungen zeigen, daß ein weiterer Chlor-Konzentrationsanstieg nicht zu verhindern ist (vgl. Kap. 3).

In Tabelle 12 sind für die wichtigsten FCKW, H-FCKW, CKW und Halone die Konzentrationen in der Troposphäre, der globale Anstieg der Konzentrationen und die Verweilzeiten angegeben. Die Daten sind das Ergebnis zahlreicher Meßkampagnen.

Die Verbindung FCKW 113 sowie das teilhalogenierte FCKW 22 zeigen mit Konzentrationsanstiegen von zehn beziehungsweise sieben Prozent pro Jahr sehr ausgeprägte Zunahmen, allerdings auf relativ niedrigem Konzentrationsniveau (vgl. Tab. 12).

Die in Abbildung 10 dargestellten Konzentrationsanstiege, gemessen an der Station Cape Grim in Tasmanien, zeigen die drastische Zunahme der ausschließ-

lich industriell hergestellten FCKW 11, 12, 113 und H-FCKW 22 sowie von Methylchloroform. Die Konzentration der Verbindung Tetrachlorkohlenstoff ist in den vergangenen fünf Jahren ebenfalls angestiegen.

Der häufigste halogenierte Kohlenwasserstoff, Methylchlorid ( $\text{CH}_3\text{Cl}$ ), wird vorwiegend durch natürliche Quellen freigesetzt. Eine wichtige Quelle stellt vermutlich die Biomasseverbrennung dar.

Die Konzentration bromierter Verbindungen, die im Bereich von 1 bis 2 pptv liegt (vgl. Tab. 12), ist zwar im Vergleich zu chlorierten Substanzen deutlich geringer, sie sind jedoch aufgrund ihres sehr hohen Ozonzerstörungspotentials ebenfalls von Bedeutung. Die Hauptquelle des Broms in der Stratosphäre sind die hauptsächlich durch natürliche Prozesse freigesetzten Stoffe Methylbromid ( $\text{CH}_3\text{Br}$ ), Methylendibromid ( $\text{CH}_2\text{Br}_2$ ) und Bromoform ( $\text{CHBr}_3$ ) sowie die zum Feuerlöschen verwendeten und industriell hergestellten Halone 1211 ( $\text{CBrClF}_2$ ) und Halon 1301 ( $\text{CBrF}_3$ ) sowie die als Kraftstoffzusatz eingesetzte Verbindung Dibromethan ( $\text{C}_2\text{H}_4\text{Br}_2$ ). Die Konzentration der Halone in der Atmosphäre hat in den vergangenen Jahren ebenfalls deutlich zugenommen (27).

Tabelle 12

### Konzentration, globaler Anstieg der Konzentrationen und Verweilzeit verschiedener Gase in der Troposphäre

	Mischungsverhältnis *) 1987 pptv	Konzentrationsanstieg *)		Lebensdauer **) Jahr
		pptv/Jahr	%/Jahr	
FCKW 11 .....	240	9,5	4	60
FCKW 12 .....	415	16,5	4	120
FCKW 113 .....	45	4–5	10	90
FCKW114 .....	15			200
FCKW115 .....	5			400
H-FCKW 22 .....	100	7	7	15
H-FCKW 123 .....				1,6
H-FCKW 124 .....				6,6
FKW 125 .....				28
FKW 134 a .....				16
H-FCKW 141 b .....				8
H-FCKW 142 b .....				19
FKW 143 a .....				41
FKW 152 a .....				1,7
$\text{CCl}_4$ .....	140	2	1,5	50
$\text{CH}_3\text{CCl}_3$ .....	150	6	4	6
$\text{CH}_3\text{Cl}$ .....	600			
Halon 1301 .....	2	0,3	15	110
Halon 1211 .....	1,7	0,2	12	
$\text{CH}_3\text{Br}$ .....	10–15			

\*) (24)

\*\*) (25)

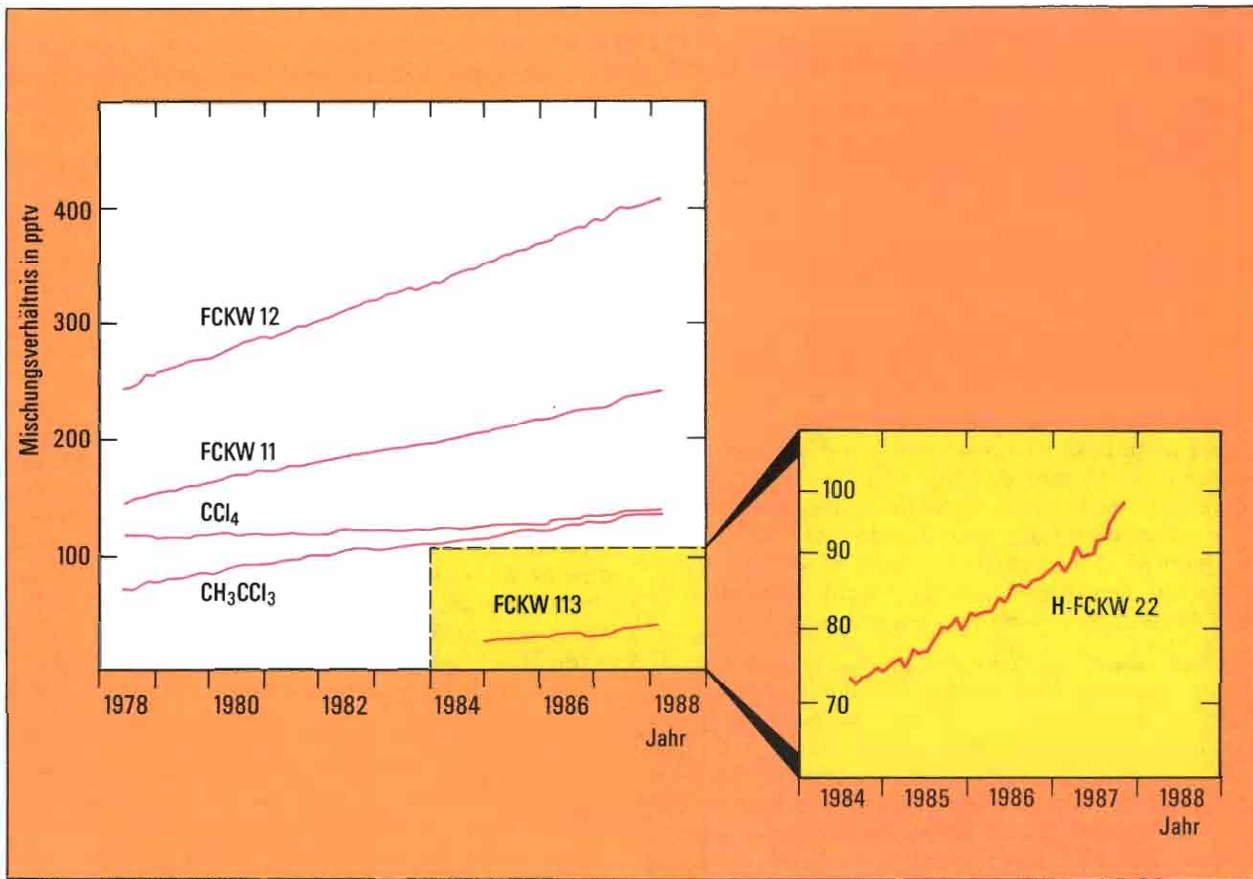


Abb. 10: Konzentrationsanstieg von FCKW 11, 12, 113 und H-FCKW 22 sowie der Verbindungen Tetrachlorkohlenstoff und Methylchloroform, gemessen an der Station Cape Grim in Tasmanien (26).

### 3. Anwendungen sowie Möglichkeiten der Verbrauchs- und Emissionsreduzierung

#### 3.1 Fluorchlorkohlenwasserstoffe

##### 3.1.1 Allgemeines

Fluorchlorkohlenwasserstoffe (FCKW) wurden Ende des letzten Jahrhunderts erstmals synthetisiert und werden seit den dreißiger Jahren – zunächst für den Einsatz als Kältemittel – großtechnisch hergestellt. Wegen ihrer günstigen Eigenschaften – FCKW sind unbrennbar, ungiftig, haben eine niedrige Wärmeleitfähigkeit, sind chemisch inert sowie geruchs- und geschmacksneutral – werden diese Stoffe seit den fünfziger Jahren auch in hohem Umfang in anderen Anwendungsgebieten eingesetzt.

Zur Kennzeichnung der FCKW hat sich folgende Nomenklatur durchgesetzt:

FCKW 1 1 4

- Anzahl der Fluoratome
- Anzahl der Wasserstoffatome + 1
- Anzahl der Kohlenstoffatome – 1

Chloratome werden nicht mitgezählt.

FCKW werden als Lösungs- und Reinigungsmittel, als Kältemittel in der Klima- und Kältetechnik, als Verschäumungsmittel in der Kunststoffbranche sowie als Treibmittel in Spraydosens (Druckgaspackungen) eingesetzt (vgl. Tab. 3). Daneben existieren noch einige mengenmäßig wenig bedeutende Einsatzgebiete wie beispielsweise die Lecksuche in größeren Leitungssystemen. Auch als Vereisungsmedium bei Sterilisationsreaktionen finden FCKW Verwendung.

##### 3.1.2 Reinigungs- und Lösemittel

Die Verwendung von FCKW 113 als Lösemittel bei der Oberflächenbehandlung und Textilreinigung hat international in den vergangenen Jahren deutlich zugenommen und macht derzeit einen hohen Anteil am FCKW-Gesamtverbrauch in der Bundesrepublik Deutschland aus (vgl. Tab. 3). Es handelt sich um ein sehr heterogenes Einsatzgebiet, das von sehr großen Anlagen mit Füllmengen von einigen hundert Kilogramm bis zu kleinen Reinigungsbädern mit einem Kilogramm Inhalt reicht. Die Schätzungen der verwendeten FCKW-Menge, hauptsächlich des FCKW 113, ist sehr ungenau. Genaue Angaben über die Verbrauchsentwicklung seit 1986 liegen der Enquete-Kommission nicht vor.

### – Oberflächenbehandlung

Mit FCKW werden Gegenstände gereinigt, die hinsichtlich ihrer

- Oberflächenbeschaffenheit (zum Beispiel lackierte Oberflächen)
- Materialbeschaffenheit (zum Beispiel Kunststoffe)
- Materialzusammenstellung (zum Beispiel Metall/Kunststoffverbindungen)

besonders empfindlich sind. Die Verbindung FCKW 113 hat für die Verwendung in diesem Einsatzgebiet eine Reihe von Vorteilen: Sie ist chemisch und thermisch sehr stabil, löst Öl und Fette gut, mischt sich hervorragend mit Kohlenwasserstoffen und erfordert wegen ihrer Unbrennbarkeit und niedrigen akuten Toxizität keine besonderen Sicherheitsvorkehrungen. Neben der Elektronik und Elektrotechnik, die das Haupteinsatzgebiet darstellen, wird FCKW 113 in vielen anderen industriellen und gewerblichen Sektoren zur Oberflächenbehandlung herangezogen.

Die bei der Oberflächenbehandlung eingesetzten FCKW werden weitgehend direkt in die Atmosphäre emittiert. Lediglich bei größeren Anlagen wird ein Anteil von etwa fünf bis zehn Prozent entsorgt. FCKW haben bei Raumtemperatur einen hohen Dampfdruck und somit eine hohe Sättigungskonzentration, so daß sie je nach Konzeption und Betriebsweise der Anlage relativ schnell verdunsten. Diese Verluste sind vom Ausmaß der Undichtigkeiten der Anlage, vom Behandlungsverfahren, dem Behandlungsablauf und von den Werkstückformen abhängig.

Eine Minderung der FCKW-Emission sollte in diesem Anwendungsbereich primär durch Substitution der FCKW erreicht werden. In der Übergangszeit können Emissionsreduktionen durch betriebliche, organisatorische, konstruktive und prozeßtechnische Maßnahmen sowie durch Rückgewinnung mittels Kondensation oder Adsorption beziehungsweise Absorption erreicht werden. Für die Anwendungsbereiche muß im einzelnen geprüft werden, welche Lösungsmöglichkeit beziehungsweise welche Kombination mehrerer Teillösungen am sinnvollsten ist.

FCKW können ersetzt werden durch Prozeßumstellungen, die den Reinigungsschritt überflüssig machen, durch wässrige Reinigungssysteme, durch nicht-halogenierte organische oder chlorierte organische Lösungsmittel sowie durch Plasmareinigungsverfahren. Teilhalogenierte FCKW (zum Beispiel H-FCKW 123, 225 ca, 225 cb) werden ebenfalls für die Verwendung in der Oberflächenreinigung untersucht; ihr langfristiger Einsatz ist jedoch wegen ihrer Ozon- und Klimawirksamkeit (vgl. Nr. 2.1, Nr. 2.2) aus umweltpolitischer Sicht nicht akzeptabel.

Hieraus folgt, daß in diesem Anwendungsbereich der FCKW-Verzicht bis zum Jahr 1994 technisch möglich und erforderlich ist.

### – Textilreinigung

Der Einsatz von FCKW 113 bei der Textilreinigung hat in den vergangenen zehn Jahren stark zugenommen.

Während 1986 in der Bundesrepublik Deutschland etwa 3 000 Tonnen FCKW verbraucht wurden, lag der Verbrauch 1979 nur bei etwa 200 Tonnen. Etwa 20 Prozent der chemischen Reinigungsmaschinen verwenden FCKW als Reinigungsmittel. In den übrigen Anlagen wird fast ausschließlich Perchlorethylen (Per) eingesetzt.

Die internationale Pflegekennzeichnung von Textilien schreibt vor, daß die mit dem Pflegesymbol „F“ gekennzeichneten Textilien nur in FCKW 113 oder in Schwerbenzin gereinigt werden dürfen. Wegen der Brennbarkeit und physiologischen Bedenklichkeit wird das ursprünglich hauptsächlich verwendete Benzin als Lösungsmittel in der chemischen Reinigung in der Bundesrepublik kaum noch eingesetzt. In Japan und den Vereinigten Staaten ist dagegen 50 bis 60 Prozent beziehungsweise 20 Prozent der in chemischen Reinigungen verwendeten Lösemittelmengen Schwerbenzin. Das „klassische Schwerbenzin“, das einer Erdölfraktion im Siedebereich zwischen 180 und 210° C entspricht, enthält Benzol sowie andere Aromaten und ist daher aus toxikologischer Sicht nicht akzeptabel. Heute steht allerdings aromatenarmes Schwerbenzin mit einem sehr engen Siedebereich zur Verfügung, das nach dem jetzigen Kenntnisstand toxikologisch wenig bedenklich ist und als Ersatz für FCKW 113 in der Textilreinigung eingesetzt werden kann. Während jedoch für die Lösemittel Per und FCKW 113 eine hoch entwickelte Maschinenteknik vorhanden ist, gibt es für die Anwendung von Schwerbenzin keine entsprechende Technik. Auf dem deutschen Markt wird keine Technik oder Verfahrenstechnologie angeboten, mit der man das aromatenarme Schwerbenzin unter Beachtung der anzustrebenden Sicherheits- und Umweltaspekte einsetzen kann. Ein weiteres Problem besteht darin, daß die Reinigungsbetriebe derzeit in Wohn- und Geschäftsgeländen liegen und deshalb wegen der Brand- und Explosionsgefahr besondere Sicherheitsanforderungen erfüllt sein müssen.

Aus Sicherheitsgründen wird von der Bekleidungsindustrie teilweise ein Etikett mit dem Symbol „F“ eingenäht, obwohl eine Behandlung in Per durchaus möglich wäre. Auch wenn mittlerweile ein deutlicher Trend zur Vermeidung von „F“-Kennzeichnungen zu erkennen ist, liegt hier noch ein hohes FCKW-Einsparpotential. Daneben werden FCKW auch für die Reinigung von Textilien eingesetzt, die mit dem Pflegehinweis „P“ gekennzeichnet sind und damit auch mit Per behandelt werden können. Es bestand in der Vergangenheit bei den Anlagebetreibern die Tendenz, Per-Lösemittel durch FCKW zu ersetzen. Dieses geschah wegen der gesundheitlichen Belastung von Anwohnern und der Kontamination von Lebensmitteln durch Emissionen aus chemischen Reinigungsanlagen, die mit Per betrieben werden.

Sehr gering ist der Erfolg von Bemühungen, die Verbraucher zu einer Umstellung auf Textilien zu bewegen, für die der normale Waschvorgang ausreichend ist und die chemische Reinigung überflüssig ist. Vielmehr werden zunehmend besonders empfindliche, hochmodisch und sehr aufwendig konstruierte Materialien hergestellt, die beim Waschen beschädigt würden.

Zusammenfassend läßt sich feststellen, daß zur Reduzierung des FCKW-Verbrauchs in chemischen Reinigungsanlagen folgende Maßnahmen notwendig sind:

- Maschinen- und betriebstechnische Maßnahmen;
- Genaue Prüfung der Notwendigkeit der Pflegekennzeichnung „F“;
- FCKW-Anwendung ausschließliche für „F“-gekennzeichnete Textilien.

Neben diesen kurzfristigen Maßnahmen muß mittelfristig FCKW 113 in der Chemischreinigung vollständig durch andere, umweltverträglichere Lösemittel ersetzt werden.

Langfristig muß angestrebt werden, chemische Reinigungsanlagen aus Wohngebieten hinaus zu verlagern, weil auch bei modernsten Anlagen und baulichen Maßnahmen Lösemittelfreisetzung und Belastungen der Umgebung nicht zu verhindern sind. Darüber hinaus ist die Errichtung größerer Anlagen sinnvoll, damit effektive Emissionsminderungsmaßnahmen mit ökonomisch vertretbarem Aufwand durchgeführt werden können.

### 3.1.3 Kunststoffverschäumung

FCKW werden bei der Verschäumung von Kunststoffen, insbesondere Polyurethan (PUR) sowie Polystyrol (PS) eingesetzt. Bei der Herstellung und Verwendung der sehr unterschiedlichen Schaumstofftypen haben FCKW unterschiedliche Funktionen. In Tabelle 13 ist die Schaumproduktion und die dafür eingesetzte FCKW-Menge für das Jahr 1986 dargestellt. Schaumstoffe werden wegen ihrer unterschiedlichen Eigenschaften und Anwendungsmöglichkeiten in Hartschaum und Weichschaum unterteilt, wobei der Übergang fließend ist.

#### – Polyurethan (PUR)-Hartschaum

PUR-Hartschaum wird als Wärmedämmstoff, Konstruktionsschaum (zum Beispiel in Kühlmöbeln), Montageschaum und in geringem Umfang auch

als Verpackungsmaterial eingesetzt. Dieser überwiegend geschlossenzellige Schaum enthält bis zu 15 Gewichtsprozent FCKW, das entspricht 90 Prozent der eingesetzten Menge. Die FCKW diffundieren langfristig aus dem Schaum beziehungsweise werden bei dessen Zerstörung freigesetzt. Das relativ großmolekulare FCKW 11 verbleibt in den geschlossenen Poren und bewirkt wegen seiner niedrigen Wärmeleitfähigkeit das sehr gute Isolationsvermögen der Schaumstoffe. Dieses Material stellt daher einen Konstruktionswerkstoff mit Wärmedämmeigenschaften dar, dessen Vorteile vor allem im Bauwesen und in der sogenannten Kühlkette genutzt werden. Die Treibmittel Kohlendioxid und Wasser diffundieren hingegen wegen ihrer geringeren Molekülgröße sehr schnell durch die Porenwände, so daß diese Schaumstoffe ein geringeres Wärmedämmvermögen aufweisen.

Die Einsatzgebiete des PUR-Hartschaums können in die Bereiche Halbzeuge (Wärmedämmung, Formteile usw.), Konstruktionsschaum (zum Beispiel Kühlmöbel) und Ortsschaum unterteilt werden. Die Halbwertszeit des im PUR-Hartschaum verbleibenden FCKW 11 wird je nach Deckschicht auf 40 bis 100 Jahre geschätzt. PUR-Hartschaum wird seit etwa 20 Jahren in großem Umfang hergestellt. Es wird angenommen, daß in der Bundesrepublik Deutschland bis 1986 mindestens 70 000 Tonnen FCKW in PUR-Hartschaumprodukten gespeichert sind und nach und nach in die Atmosphäre emittiert werden. Etwa 50 000 Tonnen davon befinden sich in Wärmedämmprodukten der Bauindustrie, der Rest in Konstruktionsschaum. Während der PUR-Hartschaum in Kühlmöbeln und teilweise auch im Kühlanlagenbau einer getrennten Entsorgung zugänglich ist, kann er im Hochbau in der Regel nicht ohne Zerstörung ausgebaut werden. Die Vernichtung der FCKW ist jedoch derzeit nicht praxiserprobt, so daß selbst bei Schäumen, die leicht ausbaubar sind, die Entsorgung der FCKW nicht gesichert ist.

Bei weitem nicht ausreichend ist die durch Anpassung der Verfahren in der PUR-Hartschaumindustrie kurzfristig erreichte Reduzierung des FCKW 11-Anteils um etwa 10 bis 30 Prozent. Als Alternativtreibmittel in PUR-Dämmplatten wird Pentan vorgeschlagen (29).

Tabelle 13

**FCKW-Verbrauch bei der Schaumproduktion im Jahr 1986 (28)**

Schaumtyp	Produktionsmenge (Tonnen)	FCKW-Verbrauch (Tonnen)
PUR-Weichschaum .....	128 000	3 500
PUR-Hartschaum .....	63 000	8 000
sonstige PUR-Schäume (Integral, Montage etc.) .....	65 000	5 500
Trennmittel für PUR-Schäume .....		2 000
XPS (Wärmedämmung) .....	27 000	4 000
PS-Schaum für Verpackung .....	5 000	500
PE-Schaum .....	7 500	500
Summe .....	295 000	24 000

Neben Pentan und Kohlendioxid wird derzeit der Einsatz der teilhalogenierten Verbindungen H-FCKW 22, 123 und 141 b geprüft.

Zur Wärmedämmung im Anwendungsbereich Halbzuge und Ortschaum können PUR-Hartschäume jedoch auch durch andere Dämmstoffe wie zum Beispiel expandierten Polystyrolschaum, Schaumglas oder Mineralfasern ersetzt werden. Die Verwendung anderer Dämmmaterialien im Kühlmöbelbau führt bei gleicher Kälteleistung und gleichen Außenmaßen zu einer Verkleinerung des Kühlschranksinnenraumes, die jedoch in Kauf genommen werden kann. Daneben sind vor kurzem Vakuumisulationsmaterialien für Kühlschränke, Kühlräume und -fahrzeuge entwickelt worden, die eine bessere Dämmwirkung als FCKW 11-getriebener PUR-Schaum besitzen, jedoch deutlich teurer sind. Diese Materialien werden als Vakuum-Isolations-Panels (VIP's) bezeichnet und auf Basis feinteiliger Kieselsäure (Siliziumdioxid, SiO<sub>2</sub>) entwickelt (30). Eine Herstellung in größerem Umfang ist ab dem Jahr 1993 vorgesehen.

#### – PUR-Integralschaum

Bei der Herstellung von Halbhartschaum-, Montageschaum- und Verpackungsprodukten werden FCKW sowohl als Treibmittel als auch als Trennmittel verwendet. Integralschaumstoffe werden in vielen Anwendungsbereichen eingesetzt, zum Beispiel in der Kraftfahrzeug-, Schuh- und Elektrogeräteindustrie und im Bauwesen. Die Verarbeitung komplizierter Formartikel aus Integralschaum erfordert wirksame Trennmittel, die häufig FCKW 11 enthalten.

Der Verbrauch FCKW-haltiger Treib- und Trennmittel für die Herstellung der Integralschäume betrug 1986 in der Bundesrepublik Deutschland 3 700 Tonnen beziehungsweise 1 400 Tonnen. Zusammen mit den im Montageschaum eingesetzten 1 800 Tonnen FCKW wurden damit in diesem Anwendungsbereich 1986 fast 7 000 Tonnen verwendet. Während das als Trennmittel eingesetzte FCKW bei der Produktion freigesetzt wird, verbleibt FCKW-haltiges Treibmittel je nach Art und Oberfläche des Integralschaums in den Poren.

Der FCKW-Verzicht bei der PUR-Integralschaumherstellung scheint kurzfristig möglich.

Montageschaum wird in Form von Spraydosen zur Ausschäumung von Hohlräumen im Baubereich eingesetzt. In den geschlossenen Zellen des Schaumes wird zwar ein Teil des Treibmittels gespeichert, der größte Teil wird jedoch bei Beförderung des Schaums aus der Dose emittiert. FCKW-freier Zweikomponenten-Montageschaum ist für einige Anwendungsbereiche auf dem Markt bereits erhältlich, beziehungsweise wird im Labor erprobt. Da FCKW-freie Alternativen existieren beziehungsweise entwickelt werden, sollte die teilhalogenierte Verbindung H-FCKW 22 nicht eingesetzt werden.

#### – Polystyrol-Hartschäume

Bei Polystyrol (PS) Schaumstoffen wird zwischen expandierten Polystyrolschaum (EPS) und dem extru-

dierten Polystyrolschaum (XPS) unterschieden, die unter dem Warennamen „Styropor“ (EPS) beziehungsweise „Styrodur“ oder „Styrofoam“ (XPS) verkauft werden. Im Gegensatz zu XPS wird EPS ohne FCKW hergestellt. 1986 wurden in der Bundesrepublik Deutschland für die Herstellung des extrudierten Polystyrolschaums etwa 4 500 Tonnen FCKW verbraucht. Etwa ein Drittel dieser Menge wird direkt bei der Produktion freigesetzt. Es wird geschätzt, daß die im XPS-Schaum gespeicherte FCKW 12-Menge in der Bundesrepublik etwa 10 000 Tonnen beträgt.

XPS-Wärmedämmstoffe zeichnen sich vor allem durch geringe Feuchtigkeitsaufnahme bei direktem Wasserkontakt und durch hohe Druckfestigkeit aus. Eine Alternative ist die Verwendung von Schaumglas. Wegen der höheren Wärmeleitfähigkeit dieses Materials muß die Dämmstoffdicke erhöht werden.

Nach Einschätzung der Industrie kann in naher Zukunft bei XPS-Schaumstoffen zwar auf vollhalogenierte FCKW, nicht jedoch auf H-FCKW 142 b und 22 verzichtet werden. In vielen Anwendungsbereichen ist eine gleichwertige Isolierung jedoch auch mit umweltverträglicheren Materialien wie zum Beispiel Schaumglas, EPS oder Mineralfasern erreichbar, wenn eine höhere Dämmstoffdicke in Kauf genommen wird.

Auf die Herstellung der PS-Schaumfolien, die zur Lebensmittelverpackung und als Wegwerfgeschirr verwendet werden, kann sofort verzichtet werden.

Außer für die genannten Schaumstoffe werden FCKW auch als Treibmittel in Polyethylen-Schaum (PE) verwendet. Die zur Herstellung eingesetzte FCKW-Menge ist zwar gering (etwa 500 Tonnen), jedoch steigt der Verbrauch an PE-Schaum stark an. Eine Reihe von Alternativtreibmitteln beziehungsweise Technologien stehen zur Verfügung.

#### – PUR-Weichschäume

PUR-Weichschäume sind offenzellig und werden zur Polsterung in der Möbelindustrie, für Matratzen und im Automobilbereich verwendet. Das eingesetzte Treibmittel FCKW 11 dient bei besonders leichten Schäumen vor allem dazu, den Schaum aufzublähen und die bei der Weichschaumherstellung entstehende Wärme abzutransportieren. Im Unterschied zum PUR-Hartschaum, bei dem FCKW als Isolationsmittel wirkt und in den Zellen verbleibt, wird FCKW bei der Weichschaumherstellung als Kühl- und Treibmittel eingesetzt und sofort nahezu vollständig freigesetzt. Weichschaum wird in Form von Blöcken oder direkt als Formschaum hergestellt. Bei der Herstellung von Schäumen mit Raumgewichten über 20 kg/m<sup>3</sup> kann in der Regel ohne FCKW geschäumt werden. Für die Herstellung leichter Schäume (unter 20 kg/m<sup>3</sup>) mit geringer Qualität sind keine Ersatztreibmittel bekannt. Bei Blockschaumanlagen wird etwa ein Drittel der FCKW während des Schäumens und der Rest beim Transport zum Lager oder kurz danach freigesetzt. Einige Tage nach Herstellung enthält der Schaum nur noch Spuren des FCKW-Treibmittels.

Bei der Weichschaumherstellung wird FCKW 11 bereits großtechnisch zurückgewonnen. Durch weiter-

gehende Umbauten an den bestehenden Anlagen kann die Ausbeute noch deutlich erhöht werden. Eine Rückgewinnung von 90 Prozent des FCKW erfordert jedoch sehr weitgehende Umbauten und Abgasreinigungsanlagen.

Wenn auf FCKW bei der Weichschaumherstellung vollständig verzichtet würde, könnten leichte Schaumstoffe (Raumgewicht unter 20 kg/m<sup>3</sup>) nicht mehr produziert werden. Einer Einstellung der Produktion dieser Schäume minderer Qualität steht unter Voraussetzung einer europaweiten Regelung auch die betreffende Industrie positiv gegenüber. Ein Einfuhrverbot FCKW-haltiger Weichschäume könnte mit aufwendigen, gängigen Analysemethoden überwacht werden.

In einigen Anwendungsbereichen, wie zum Beispiel bei der Herstellung von Sitzpolstern für Automobile, wird noch immer FCKW eingesetzt, obwohl bereits seit Jahren geeignete Alternativen zur Verfügung stehen.

Zusammenfassend kann festgestellt werden, daß ein FCKW-Verzicht bei der PUR-Weichschaum-Herstellung möglich ist und keine wesentlichen Änderungen an den bestehenden Anlagen erfordert, wenn die Produktion der Schäume mit minderer Qualität eingestellt wird.

### 3.1.4 Klima- und Kältetechnik

Kältemittel werden je nach ihren thermodynamischen, physikalischen, chemischen sowie toxischen Eigenschaften für verschiedene Einsatzgebiete in Verdichter- und Absorptionskältemaschinen verwendet. Wichtige Einsatzparameter sind der Temperaturbereich (zum Beispiel Wärmepumpe, Klimatechnik, Lebensmittelfrischhaltung oder Tieftemperaturbereich), Baugröße des Gerätes oder der Anlage (zum Beispiel Haushaltskühlschrank oder Schiffskühlanlage) und Aufstellung (zum Beispiel Privatbereich, Gewerbe oder Industrie).

FCKW sind wegen ihrer günstigen thermodynamischen Eigenschaften, der geringen Toxizität und chemischen Stabilität und der Nichtentflammbarkeit ein ideales Kältemittel der Kühl- und Kältetechnik.

In Verdichter-Kältemaschinen, die nach dem Kompressionsverfahren (Kaltdampfprozesse) arbeiten, werden überwiegend die Kältemittel FCKW 11, 12, H-FCKW 22, Ammoniak und das Gemisch R 502 (51,2 Gewichtsprozent FCKW 115, 48,8 Gewichtsprozent H-FCKW 22) eingesetzt.

Eine Möglichkeit zur Kälteerzeugung ohne FCKW ist das Absorptionssystem für Absorptions-Kältemaschinen. Hierbei werden Zweistoffgemische verwendet, die aus Kälte- und Absorptionsmittel bestehen. Gebräuchliche Stoffpaare sind zum Beispiel Ammoniak-Wasser und Lithiumbromid-Wasser. In einigen Anwendungsbereichen und bei Einsatz von Primärenergie oder Abwärme sind Absorptions-Kältemaschinen energetisch vergleichbar oder sogar günstiger als Maschinen mit Kompressionstechnik.

In der Bundesrepublik Deutschland wurden 1986 etwa 6 500 Tonnen FCKW und H-FCKW als Kältemittel

verwendet. Die beiden wichtigsten Substanzen waren FCKW 12 und H-FCKW 22 mit 2 860 Tonnen beziehungsweise 2 600 Tonnen. Nur 58 Prozent des Kältemittelverbrauchs wurden in der Bundesrepublik zur Erstfüllung der Anlagen verwendet, der Rest wurde bei Betrieb, Wartung und Reparatur der Systeme in die Atmosphäre freigesetzt. Von diesen Nachfüllmengen entfallen 50 Prozent auf gewerbliche Kälteanlagen, 25 bis 30 Prozent auf Großkälteanlagen der Industrie und 20 bis 25 Prozent auf Auto-, Gebäude- sowie Transportkälteanlagen. Im internationalen Bereich ist der prozentuale Anteil des Kältemittelverbrauchs für Nachfüllungen noch deutlich höher. Ursache für diese Emissionen sind Dichtigkeitsprüfungen und Undichtigkeiten der Anlagen und Bauteile sowie die teilweise oder vollständige Entleerung der Kältemittelkreisläufe zu Reparaturzwecken. Aber auch bei hermetisch geschlossenen Anlagen werden während der Montage beziehungsweise der Verschrottung Kältemittel in die Atmosphäre freigesetzt.

Wegen der vielfältigen Anwendungsbereiche in der Klima- und Kältetechnik müssen Vorschläge zur FCKW-Reduzierung hier sehr stark differenzieren. Während beispielsweise Anlagen mit mechanisch lösbaren Verbindungen im Kältemittelkreislauf bei Reparatur-, Wartungs- und Umbauarbeiten Kältemittel in die Atmosphäre freisetzen, verbleibt bei hermetisch geschlossenem Kältekreislauf das Kühlmittel bis zur Stilllegung des Gerätes im System, wenn keine Reparatur am Gerät durchgeführt wird. Zu den ersteren Systemen zählen Anlagen wie Großkälteanlagen für Industrie und Gewerbe, Transportkälteanlagen, Fahrzeug- und Gebäudeklimaanlagen sowie Wärmepumpen. Systeme mit hermetisch geschlossenem Kältemittelkreislauf werden überwiegend in Haushaltskühlgeräten und gewerblichen Kleinkühlgeräten eingesetzt.

FCKW werden in der Klima- und Kältetechnik nicht nur als Kältemittel, sondern auch zur Verschäumung des Isolationsmaterials eingesetzt. Bei Kühl- und Gefriergeräten ist die für die Isolierung verwendete FCKW-Menge höher als diejenige im Kältemittelkreislauf. Beim Aufstellen eines Recyclingkonzeptes ist dieser Sachverhalt zu berücksichtigen.

Hier eine kurze Darstellung der unterschiedlichen Kühlsysteme:

#### – Kälteanlagen zur gewerblichen Nutzung

Dieser Bereich, in dem fast ausschließlich FCKW eingesetzt werden, umfaßt Kühlräume, Gefrieranlagen und 75 Prozent der gewerblichen Kühlmöbel. Der Gesamtverbrauch des überwiegend eingesetzten FCKW 12 sowie des H-FCKW 22 und der Mischung R 502 und liegt zwischen 1 700 und 2 200 Tonnen pro Jahr. Etwa die Hälfte des Kältemittelverbrauchs wird zum Nachfüllen der Anlagen verwendet.

#### – Großkälteanlagen zur industriellen Nutzung

In Kühlhäusern und Großkühlanlagen verschiedenster Industriebetriebe werden zwischen 40 und

80 Prozent Ammoniak, zwischen 15 und 40 Prozent H-FCKW 22 und bis 20 Prozent FCKW 12 und R 502 eingesetzt. In industriellen Großanlagen werden insgesamt etwa 5 500 Tonnen Kältemittel pro Jahr verbraucht.

#### – Fahrzeugklimaanlagen und Transportkälteanlagen

In der Bundesrepublik Deutschland ist der mit Klimaanlagen ausgestattete Fahrzeuganteil mit 7 bis 8 Prozent im Vergleich zu den USA (80 Prozent) gering. Allerdings ist auch in der Bundesrepublik eine steigende Tendenz zu beobachten. Nur etwa 20 Prozent der pro Jahr für Fahrzeugklimaanlagen verwendeten 700 bis 800 Tonnen FCKW werden für das Inland verbraucht, der größte Teil wird mit den Fahrzeugen exportiert. Das in diesem Bereich eingesetzte Kältemittel FCKW 12 muß, während der Verweilzeit der Anlage durchschnittlich dreimal nachgefüllt werden, weil der Kältemittelkreislauf bei Wartungs- und Instandsetzungsarbeiten vollständig entleert wird und weil nicht hermetische Verdichter eingesetzt werden. Weitere Verluste entstehen zum Beispiel bei Dichtigkeitsprüfungen.

In Transportkälteanlagen, das heißt Kühlsystemen in Lastkraftwagen, Schiffen und Eisenbahnen, werden etwa zwanzig Tonnen der Kältemittel FCKW 12 und H-FCKW 22 eingesetzt. Bei Reparaturen wird der Kältemittelinhalt meist vollständig freigesetzt. Weitere FCKW-Emissionsquellen sind Leckagen und Dichtigkeitsprüfungen.

#### – Gebäudeklimatisierung

Schätzungen des Kältemittel-Jahresverbrauchs – hauptsächlich werden FCKW 11 und 12 eingesetzt – nennen etwa 440 Tonnen Gesamtverbrauch. Zur Klimatisierung werden auch Absorptionsanlagen eingesetzt, die bei Verwendung von Primär-energie oder Abwärme teilweise energetisch vorteilhafter sind als Verdichteranlagen.

#### – Haushaltskühlgeräte

In der Bundesrepublik Deutschland werden pro Jahr etwa 3 Millionen Kühl- und Gefriergeräte hergestellt und etwa 2,7 Millionen Altgeräte aus dem Verkehr gezogen. Nahezu alle Geräte arbeiten nach dem Kompressions-System mit dem Kältemittel FCKW 12. Im Durchschnitt enthält ein Gerät etwa 150 g Kältemittel. Jährlich werden etwa 410 Tonnen FCKW aus dem Kühlmittelkreislauf und rund 1 500 Tonnen FCKW aus der PUR-Hartschaumisolierung in die Atmosphäre emittiert. Die zur Zeit durch kontrolliertes Recycling erfaßte Menge ist demgegenüber nur sehr gering.

Zur FCKW-Reduzierung sind Maßnahmen bei der Konstruktion und Produktion von Neuanlagen sowie bei Betrieb, Wartung und Entsorgung der Altanlagen und die Anwendung von Alternativkältemitteln

beziehungsweise -technologien notwendig. Damit FCKW-Emissionen aus Kühlsystemen mit lösbaren Verbindungen im Kältemittelkreislauf vermieden werden, wurden der „Verhaltenskodex der EG-Kommission zur Verringerung der Emissionen der FCKW 11 und 12 aus Kälte- und Klimaanlage“, die DIN-Norm 8975 Teil 1 bis 9 sowie das VDMA-Einheitsblatt 242423 Teil 1 bis 5 vorgelegt. Wenn diese Richtlinien eingehalten werden, die durch Maßnahmen der Fachverbände Deutscher Kälte- und Klimatechnischer Verein (DKV), Verband der Kälte-Klimafachleute (VDKF) sowie des Zentralverbandes der Elektro- und Elektronikindustrie (ZVEI) umgesetzt werden, läßt sich die FCKW-Emission deutlich reduzieren. Eine weitere Hermetisierung der Kühl- und Kälteanlagen ist – unabhängig davon, welches Kältemittel verwendet wird – dringend notwendig.

Neben der Verbrauchsreduzierung bei Betrieb und Wartung der Anlage ist die Verwertung und Entsorgung gebrauchter Kältemittel von großer Bedeutung. Zur Entfernung des Kältemittels aus der Anlage existiert eine Vielzahl mobiler Geräte. Die von Großhändlern gesammelten Kältemittel werden dann an die FCKW-Hersteller zur Aufbereitung oder Entsorgung weitergeleitet. Anzustreben sind vor allem Recyclingkonzepte, die sowohl die Kältemittel als auch den PUR-Hartschaum einbeziehen. Wegen der großen Zahl der Kühlschränke und Gefriergeräte erfordert die Entsorgung einen hohen organisatorischen Aufwand. Die Entsorgung sollte das gut ausgebaute Händlernetz, die Infrastruktur der Kälte- und Klimatechnikfachbetriebe sowie kommunale Entsorgungsunternehmen einbinden. Auch wenn FCKW 12 substituiert wird, ist wegen der existierenden etwa 24 Millionen Haushaltskühlschränke ein Entsorgungskonzept sinnvoll. Neben den dargestellten technischen und organisatorischen Maßnahmen ist in Altanlagen die Substitution der FCKW durch „Drop in“-Stoffe (das heißt ohne wesentliche technische Änderung) notwendig.

Unter Umweltgesichtspunkten müssen die Alternativkältemittel sowohl in ihrer Ozonwirksamkeit als auch in ihrer Treibhauswirksamkeit bewertet werden. Zur Beurteilung der Treibhauswirksamkeit müssen die Kältemittel auch energetisch untersucht werden. Ein mögliches Ersatzmittel für FCKW 12 in Altanlagen, eine Mischung aus H-FCKW 22, 124 und FKW 152 a, steht voraussichtlich von 1993 an zur Verfügung. Zur selben Zeit wird voraussichtlich das geplante Ersatzkältemittel FCKW 134 a in industriellen Mengen hergestellt werden. Unstimmigkeiten liegen über den Entwicklungsstand eines mit FKW 134 a verträglichen Kältemaschinenöls vor.

Verfügbare Ersatzstoffe und -technologien:

- Die Absorptionstechnik, die sich in vielen Anwendungsbereichen bereits bewährt hat, bietet in Neuanlagen Vorteile und muß verstärkt eingesetzt werden.
- Das bewährte Kältemittel Ammoniak, das einen Anteil von 30 Prozent am Gesamtverbrauch hat, ist stärker zu nutzen.
- Das Stoffpaar Zeolith-Wasser ist sofort verfügbar und geeignet, in einem großen Bereich der Kälte-



Klima- und Wärmepumpentechnik FCKW zu substituieren. Zeolith ist ein Silizium-Aluminiumoxid mit einer regelmäßigen, offenporigen Kristallstruktur und zum Beispiel in Fahrzeugklimaanlagen anwendbar (31).

- H-FCKW 22 steht großtechnisch in ausreichendem Umfang zur Verfügung und wird, da es ohne große technische Schwierigkeiten in vielen Anwendungsbereichen verwendet werden kann, von der Klima- und Kältetechnik als Ersatzstoff angesehen. Diese teilhalogenierte Verbindung könnte außer in Haushaltsgeräten und der Automobil-Klimatechnik in vielen Bereichen zum Einsatz kommen. Unter Umweltaspekten ist dieser Stoff nicht für einen längerfristigen Einsatz geeignet.
- FKW 152 a wird bisher neben FCKW 12 als Mischkomponente mit 26,2 Gewichts-Prozent im Azotrop R 500 eingesetzt. Der Einsatz des brennbaren FKW 152 a, das günstige thermodynamische Daten aufweist, erscheint insbesondere bei kleineren Anlagen technisch beherrschbar und sollte verstärkt zur Anwendung kommen.

### 3.1.5 Spraydosen

Die Verwendung von FCKW 11 und 12 als Aerosol-Treibmittel wurde in den Vereinigten Staaten, in Kanada und Schweden Ende der siebziger Jahre zum größten Teil verboten, die Stoffe wurden durch andere Systeme oder Chemikalien ersetzt. Auch in der Bundesrepublik Deutschland ist der FCKW-Einsatz in Spraydosen, der bis vor wenigen Jahren das Hauptanwendungsgebiet der FCKW war, heute relativ gering. Durch die im August 1987 von der Industriegemeinschaft Aerosole e.V. (IGA) vorgelegte freiwillige Selbstverpflichtung wurde erreicht, daß in den größten Produktgruppen, das heißt bei Körperpflege-, Haushalts- und Autopflegeprodukten usw., keine FCKW verwendet werden.

Tabelle 14 zeigt die FCKW-Reduzierungsschritte für die in der Bundesrepublik hergestellten Sprayprodukte:

Tabelle 14

#### FCKW-Verbrauchsmenge in Spraydosen im Zeitraum von 1976 bis 1989 in der Bundesrepublik Deutschland

1976	.....	53 000 Tonnen
1980	.....	36 000 Tonnen
1986	.....	26 000 Tonnen
1987	1. Halbjahr	14 928 Tonnen
	2. Halbjahr	5 728 Tonnen
1988	1. Halbjahr	2 612 Tonnen
	2. Halbjahr	2 148 Tonnen
1989	1. Halbjahr	1 486 Tonnen
	2. Halbjahr	1 170 Tonnen

Derzeit werden als Treibmittel vorwiegend eingesetzt

- leichtflüchtige, unter Druck leicht zu verflüssigende Gase, deren Dampfdruck bei 20 Grad Celsius zwischen ein und vier Bar liegt (Flüssiggase): Propan, Isobutan, n-Butan, Dimethyläther (DME);
- „Permanentgase“: Stickstoff, Luft, Kohlendioxid, Distickstoffoxid.

Im Unterschied zu den FCKW sind die derzeit verwendeten Treibmittel Propan, Butan und DME brennbar. Für den Verbraucher entstehen aber wegen der durch die Ventile erzeugten Luftvermischungen keine Nachteile oder erhöhte Risiken.

Nach Aussagen der IGA und des Bundesverbandes der Pharmazeutischen Industrie e.V. (BPI) können FCKW in einigen technischen und medizinischen Sprayprodukten derzeit nicht ersetzt werden. Zu den technisch-industriellen Sprays gehören Produktarten für Service und Reparatur in Optik und Elektronik, spezielle Reinigungs- und Pflegesprays, verschiedene Trennmittel und einige Spezialsprays. Der Verzicht auf FCKW wird in diesem Bereich durch die Brennbarkeit der Alternativtreibmittel erschwert. Der gegenwärtig FCKW-Verbrauch in technischen Sprayprodukten beträgt in der Bundesrepublik Deutschland jährlich etwa 300 Tonnen.

Im medizinischen Anwendungsbereich der Spraydosen sind die Anforderungen an die toxikologische Unbedenklichkeit des Treibmittels besonders hoch. In einigen lebenserhaltenden medizinischen Anwendungsbereichen, wie etwa zur Behandlung des Bronchialasthmas und zur Vorbeugung und Behandlung des Angina-Pectoris-Anfalls stehen nach Angaben des BPI keine geeigneten FCKW-freien Treibmittel zur Verfügung. 1987 und 1988 wurden jeweils 700 Tonnen FCKW in medizinischen Sprays verwendet. Das vom BPI bezifferte FCKW-Einsparpotential liegt hier für 1990 und 1991 bei jährlich etwa 160 Tonnen.

Sowohl für technische als auch für medizinische Sprayprodukte muß ein Verwendungs- und Notwendigkeitsnachweis verlangt werden. Der Anwendungsbereich muß detailliert aufgeschlüsselt werden, damit überprüfbar ist, ob die FCKW-Verwendung zum Erhalt menschlichen Lebens notwendig und unumgänglich ist.

Im Jahr 1989 wurden nach Angaben der IGA neben dem medizinischen und technischen Anwendungsbereich etwa 1 500 Tonnen FCKW 11 und 12 in herkömmlichen Spraydosen (Haarsprayss, Körperpflegesprays etc.) eingesetzt, die für den Export hergestellt wurden.

Der Einsatz von H-FCKW 22 sowie anderer zur Diskussion stehender teilhalogenerter FCKW ist in Sprays nicht erforderlich, da eine Vielzahl anderer und umweltverträglicherer Ersatzstoffe und -technologien verfügbar ist. Vom BGA wird der Einsatz in verbrauchernahen Bereichen wegen der nicht vollständig geklärten toxikologischen Eigenschaften nicht empfohlen. Es muß darauf hingewiesen werden, daß die meisten Produkte außer durch die üblichen

Spraydosen auch durch andere Sprühsysteme (Pumpensprüher, Zwei-Kammer-Druckgaspackung) und durch Alternativen zum Spray verteilt werden können. Pumpensprüher sind, wenn von deren Nachfüllmöglichkeit Gebrauch gemacht wird, preisgünstiger und können zu einer deutlichen Reduzierung des Abfalls beitragen. Als Alternativen zu Spraydosen sind eine Reihe anderer Verteilungssysteme wie Cremes, Zerstäuber und Roller einsetzbar und ökologisch und meist auch ökonomisch vorteilhaft.

### 3.1.6 Sonstige Anwendungen

Eine weitere FCKW-Anwendung sind die bei Sportveranstaltungen eingesetzten Lärmfanfaren, die mit Gasdruckbehältern betrieben werden. Zwar wird durch die Lärmfanfaren eine relativ geringe FCKW-Menge von etwa 100 Tonnen freigesetzt, jedoch handelt es sich um eine sinnlose Anwendung, die unverzüglich eingestellt werden muß. Hinzu kommt, daß die mit FCKW 12 gefüllten Treibgasfanfaren wahrheitswidrig mit einem Etikett „FCKW-frei, greift die Ozonschicht nicht an“ versehen sind.

Seit einigen Jahren werden für Reparaturarbeiten an flüssigkeitsgefüllten Rohrleitungen sogenannte Rohrfroster oder Kälteklammern verwendet. Die Gesamtemission des hierfür eingesetzten Kältemittels H-FCKW 22 wird in der Bundesrepublik Deutschland auf etwa 1 200 Tonnen pro Jahr geschätzt (32). Auf die Verwendung von H-FCKW und FCKW kann durch den Einsatz von Flüssigstickstoff, Kohlensäurekälte sowie Ammoniak-Kälteanlagen sofort verzichtet werden.

## 3.2 Halone

### 3.2.1 Allgemeines

Halogenkohlenwasserstoffe, die neben Fluor- und Chlor- auch Bromatome enthalten, werden als Halone (HALogenated hydrocarbON) bezeichnet. Die weltweit technisch wichtigsten bromhaltigen Verbindungen

Halon 1301 — Bromtrifluormethan —  $\text{CF}_3\text{Br}$ ,  
 Halon 1211 — Bromchlordifluormethan —  $\text{CF}_2\text{ClBr}$   
 und  
 Halon 2402 — Dibromtetrafluorethan —  $\text{C}_2\text{F}_4\text{Br}_2$

werden fast ausschließlich zur Feuerlöschung und Explosionsunterdrückung verwendet. Halone sind bei der Brandbekämpfung sehr effektiv, elektrisch nicht leitend, breiten sich schnell aus, hinterlassen keine sichtbaren Rückstände und gefährden im Normalfall bei der Anwendung Menschen nicht direkt.

Zur Kennzeichnung der Halone hat sich folgende Nomenklatur durchgesetzt:

Halon 1 2 1 1

— Anzahl der Bromatome  
 — Anzahl der Chloratome  
 — Anzahl der Fluoratome  
 — Anzahl der Kohlenstoffatome

### 3.2.2 Feuerlöschung

Brände können in ihrer Entstehungsphase nur sicher mit Halon gelöscht werden, wenn sich noch keine Glut gebildet hat; das heißt, zwischen dem Ausbruch des Feuers und dem Beginn der Löscharbeiten darf nur kurze Zeit vergangen sein.

Halon 1301 wird als Löschmittel in stationären, meist automatisch ausgelösten Raumschutzanlagen eingesetzt; Halon 1211 kommt überwiegend in tragbaren Handfeuerlöschern und mobilen Löschgeräten zum Einsatz. Beide Substanzen sind in der Bundesrepublik nur zum Ablöschen von Bränden der Brandklasse B (brennbare Flüssigkeiten) und der Brandklasse C (brennbare Gase) zugelassen. In der Bundesrepublik Deutschland und in westeuropäischen Ländern ist, im Gegensatz zur UdSSR, das Feuerlöschmittel Halon 2402 nicht zugelassen.

Eingesetzt werden Halone — und hier vor allem das Halon 1301 — in elektronischen Datenverarbeitungsanlagen und in sonstigen elektrischen Anlagen. Hier befinden sich jedoch überwiegend Stoffe der Brandklasse A, das heißt feste, glutbildende Stoffe wie Holz, Papier und Textilien. Kunststoffe, vor allem PVC, zum Teil auch Polyethylen für Kabelisolierungen, Polyester und Polyurethan-Weichschäume, die teilweise für Innenausbauten beziehungsweise zur Schallisolierung, Möbelpolsterung etc. verwendet werden, sind glutbildende Stoffe. Das bedeutet, daß sich, wie beispielsweise bei Holz und Papier, „tiefsitzende“ Glutbrände bilden, die bereits nach wenigen Minuten Vorbrenndauer von Halonen nicht mehr gelöscht werden können.

Zwar sind die Halone bei normaler Löschkonzentration für den Menschen von geringer Toxizität und entfalten erst bei höheren Konzentrationen eine anästhesierende Wirkung. Dies gilt jedoch nicht uneingeschränkt für die bei Bränden entstehenden Zersetzungsprodukte. Bei den auftretenden hohen Temperaturen werden Bromwasserstoff (HBr), Flußsäure (HF) und Salzsäure (HCl) gebildet, die für Menschen toxisch sind.

Halon-Löschanlagen erfordern einen geringeren konstruktiven und organisatorischen Aufwand als konventionelle Löschsysteme, und es treten keine sichtbaren Löschmittelrückstände auf. Halon 1211 hat im Vergleich zu Halon 1301 einen relativ hohen Siedepunkt; deshalb kann sich ein Flüssigkeitsstrahl ausbilden, mit dem gezielt gelöscht werden kann. In der Handhabung unterscheiden sich diese Handfeuerlöschgeräte jedoch nicht von vergleichbaren konventionellen Handfeuerlöschern (Schaum-,  $\text{CO}_2$ - und Pulverlöschern).

Der Löscheffekt der Halone wird durch die antikatalytische Wirkung des Bromradikals verursacht. Während eine Halonkonzentration von 5 bis 7 Prozent das Feuer sofort löscht, ist für die gleiche Wirkung eine Löschkonzentration von 30 bis 40 Volumen-Prozent  $\text{CO}_2$  erforderlich. Das bedeutet, daß bei der Verwendung von Halonen Menschen dem Löschmittel kurzzeitig ohne Bedenken ausgesetzt werden dürfen und ein Raum vor der Flutung nicht zwingend geräumt werden muß. Hingegen ist die  $\text{CO}_2$ -Konzentration, die erforderlich ist, ein Feuer zu ersticken, für den Men-

schen tödlich. Dies ist der entscheidende Unterschied zwischen den Löschmitteln CO<sub>2</sub> und Halon für den Raumschutz und Ursache für den bevorzugten Einsatz von Halonanlagen in den letzten Jahren.

Seit einigen Jahren ist ein Trend zu verzeichnen, stationäre Halon-Feurlöschanlagen in Räumen zu installieren, in denen keine brennbaren Flüssigkeiten oder Gase vorhanden sind. Halon-Handfeuerlöschgeräte werden verstärkt in Bereichen eingesetzt, in denen auch andere Löschmittel (Pulver, CO<sub>2</sub>, Schaum) zur Brandbekämpfung eingesetzt werden können.

Halon-Raumschutzanlagen müssen vor Inbetriebnahme verschiedenen Tests unterzogen werden. Hierzu zählt unter anderem eine Probeflutung, die bis Mai 1989 grundsätzlich mit Halonen durchgeführt wurden. Seit diesem Zeitpunkt wird – wie auch von der Enquete-Kommission im ersten Bericht gefordert – der Einsatz des Prüfmediums Kohlendioxid, vom Verband der Sachversicherer außer für Spezialfälle verbindlich vorgeschrieben.

Der einzige Halon-Hersteller in der Bundesrepublik Deutschland, die Kali-Chemie, gibt die Produktions- und Verbrauchsmengen nicht bekannt, so daß darüber keine verlässlichen und überprüfbaren Zahlen vorliegen. Schätzungen der Halon-Verbrauchsmengen in der Bundesrepublik liegen zwischen 1 300 bis 2 000 Jahrestonnen (vgl. auch Nr. 1.2.2). Nach den Statistiken des Verbandes der Sachversicherer (VdS) und des Bundesverbandes Feuerlöschgeräte und Anlagen (BFVA) betrug die Anzahl der Halon-Neuanlagen 1980 59 und stieg im Jahr 1986 auf 680 an. Im Vergleich dazu sank die Anzahl der Kohlendioxid-Neuanlagen von 135 im Jahr 1980 auf 26 im Jahr 1986.

In den USA werden nach Angaben der Industrial Economics knapp 80 Prozent der verbrauchten Halon 1301-Menge zum Füllen und Probefluten neuer Raumschutzanlagen eingesetzt. Bei Fehlalarmen, Wartungsarbeiten sowie durch Leckagen entweichen weitere 13 Prozent. Nur knapp 7 Prozent werden zur Feuerlöschung verwendet (vgl. Abb. 11). In der Bun-

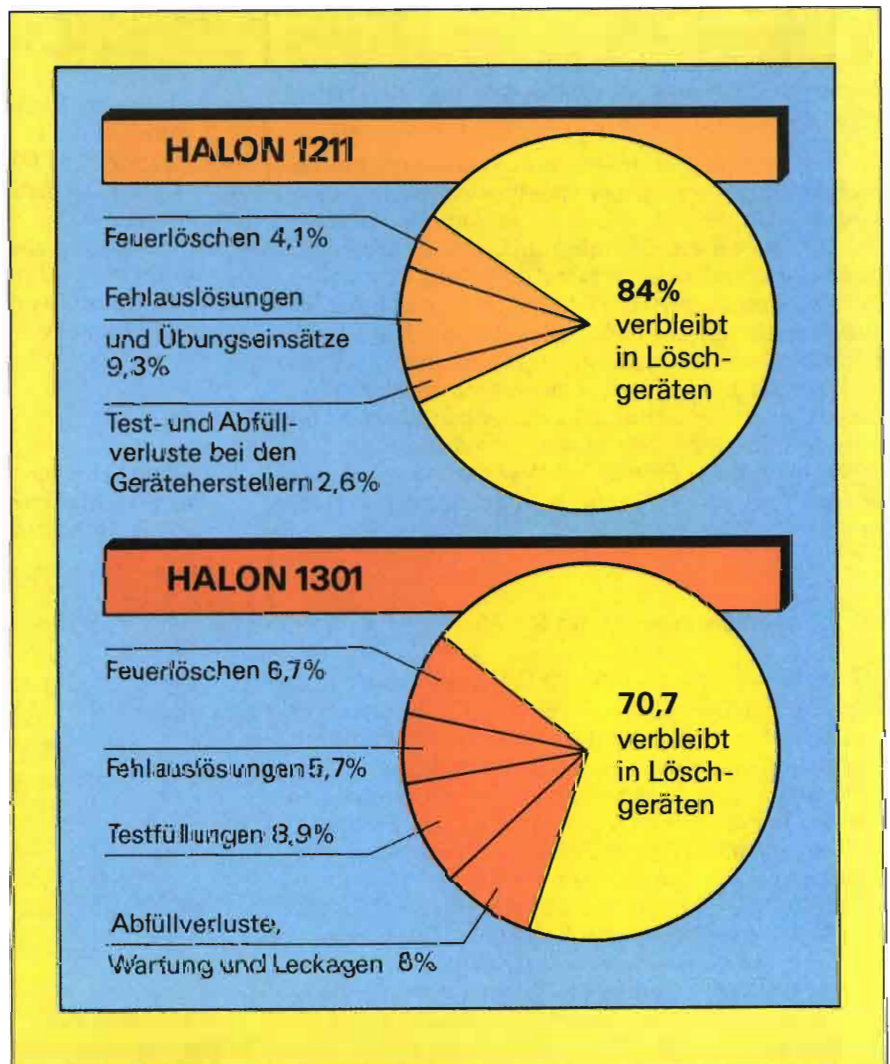


Abb. 11: Verwendung der Halon-Feuerlöschmittel (33).

desrepublik Deutschland ist wegen der im Mai 1989 getroffenen Regelung, Probeflutungen nur noch in Ausnahmefällen mit Halonen durchzuführen, der Emissionsanteil durch Tests deutlich geringer anzusetzen. Nach der bereits erwähnten Statistik der Industrial Economics werden in den USA 84 Prozent der verbrauchten Halon 1211-Menge für das Füllen neuer Geräte verwendet. Nur gut 4 Prozent werden zur Feuerlöschung verbraucht, der Rest entweicht bei Übungseinsätzen und sonstigen Verlusten (vgl. Abb. 11). Es wird angenommen, daß in der Bundesrepublik eine vergleichbare Struktur vorliegt.

Ein Ersatzstoff für Halone mit vergleichbaren Eigenschaften ist zwar voraussichtlich innerhalb der nächsten Jahre nicht verfügbar, jedoch sind eine Reihe Alternativtechnologien zur Brandbekämpfung vorhanden. Im zivilen Bereich kann Halon in nahezu allen Anwendungen durch die Löschmittel CO<sub>2</sub> und Wasser ersetzt werden. Löschesysteme, die aus einer Kombination von CO<sub>2</sub>-Objektschutz- und Sprinkler-Raumschutzanlagen bestehen, haben sich seit Jahrzehnten bewährt und stellen eine sofort verfügbare Alternative zu Halon-Raumflutungsanlagen dar. Auch der Ersatz des Halon 1211 in Handfeuerlöschern und mobilen Geräten ist durch die Verwendung von Pulver-, CO<sub>2</sub>-, Schaum- und Wasserlöschgeräten sowie Löschdecken kurzfristig möglich. Lediglich in sehr wenigen Anwendungsfällen, wie zum Beispiel in Flugzeugen, Panzern oder U-Booten, kann derzeit auf den Halon-Einsatz nicht verzichtet werden (34).

Zusätzlich zu der erforderlichen Halon-Substitution ist eine Verringerung des Halonreservoirs in bestehenden Anlagen und Geräten notwendig. Es sollte daher dringend ein Entsorgungskonzept aufgestellt werden, das ein vollständiges Recycling der in den Anlagen gespeicherten Halonmenge gewährleistet. Eine Beseitigung der Halone scheint zur Zeit jedoch ebenso wie die völlige, rückstandsfreie Entnahme aus den Anlagen und Geräten noch problematisch zu sein. Halon-Emissionen können durch konstruktive und organisatorische Maßnahmen weiter reduziert werden, die Verluste beim Füllen, bei Wartungsarbeiten und Leckagen sowie Auslösung von Fehlalarmen verhindern.

### 3.3 Chlorkohlenwasserstoffe (CKW)

Der überwiegende Teil der Chlorkohlenwasserstoffe wird in der Troposphäre photolytisch oder chemisch umgewandelt und gelangt nicht in die Stratosphäre. Die leichtflüchtigen CKW werden vorwiegend in der Reinigungs- und Lösemittelbranche eingesetzt und belasten in hohem Maße Luft, Wasser und Boden sowie die gesamte Nahrungskette. Im folgenden werden nur Aussagen zu den Verbindungen Methylchloroform (CH<sub>3</sub>CCl<sub>3</sub>) und Tetrachlorkohlenstoff (CCl<sub>4</sub>) getroffen, die größere ODP-Werte haben als andere in stärkerem Umfang eingesetzte CKW. Der ODP-Wert anderer CKW (namentlich das Trichlorethan, Tetrachlorethan/Per und Dichlormethan) sind noch nicht genau bekannt; sie sind aber wegen der geringen Verweilzeiten (vgl. Tabelle 8) wahrscheinlich kleiner als von CH<sub>3</sub>CCl<sub>3</sub> und CCl<sub>4</sub>.

### 3.3.1 Methylchloroform (CH<sub>3</sub>CCl<sub>3</sub>)

In der Bundesrepublik Deutschland wird Methylchloroform zur Oberflächenreinigung und in geringerem Umfang in Farben, Lacken und Klebstoffen verwendet. In den USA und Japan wird diese Verbindung auch in chemischen Reinigungsanlagen eingesetzt.

In Westeuropa sind die Hauptemissionsquellen für CH<sub>3</sub>CCl<sub>3</sub> in die Atmosphäre:

- Metallreinigung (Kalt- und Dampfentfettung) ca. 75 Prozent der Gesamtemission
- Klebstoffe ca. 10 Prozent der Gesamtemission
- Elektronik ca. 5 Prozent der Gesamtemission
- Verschiedenes ca. 10 Prozent der Gesamtemission

CH<sub>3</sub>CCl<sub>3</sub> wird zunehmend als Ersatz für Trichlorethen und Tetrachlorethan eingesetzt, weil es gut lösbar ist, auf Menschen kaum toxisch wirkt und sich nur schwer entzündet. Im Vergleich zu FCKW, die oft bei speziellen Problemstellungen angewandt werden, kann CH<sub>3</sub>CCl<sub>3</sub> vor allem durch wässrige Reinigungssysteme substituiert werden.

Genau Verbrauchszahlen müssen in der Bundesrepublik ebenso wie für FCKW, H-FCKW und Halone aus Geheimhaltungsgründen nicht veröffentlicht werden. Für 1986 wird eine Verkaufszahl von 38 500 Tonnen angegeben. In den darauf folgenden Jahren war die verbrauchte Menge leicht rückläufig. Die jährliche weltweite CH<sub>3</sub>CCl<sub>3</sub>-Produktion ist im Zeitraum 1970 bis 1988 von 155 000 Kilogramm auf 678 000 Kilogramm stark angestiegen (vgl. Abb. 12). Die Verteilung der jährlichen Verkaufsmenge auf die verschiedenen geographischen Breiten ist in Tabelle 15 angegeben. Zwischen 1980 und 1988 wurden allein in der nördlichen Nordhemisphäre 90 bis 94 Prozent der Gesamtproduktion verkauft.

Tabelle 15

#### Jährliche Verkaufsmenge von CH<sub>3</sub>CCl<sub>3</sub> in verschiedenen geographischen Breiten; in Millionen Kilogramm (36)

Jahr	0–30° N	30–90° N	0–90° S
1980	9	519	24
1981	11	517	21
1982	11	483	21
1983	11	510	19
1984	16	562	22
1985	16	550	23
1986	24	558	27
1987	31	572	25
1988	40	612	27

Es wird erwartet, daß mit der Verringerung des FCKW-Einsatzes mehr CH<sub>3</sub>CCl<sub>3</sub> verbraucht werden könnte. Aus diesem Grund wurde auf der 2. Vertragsstaatenkonferenz zum Montrealer Protokoll im Juni

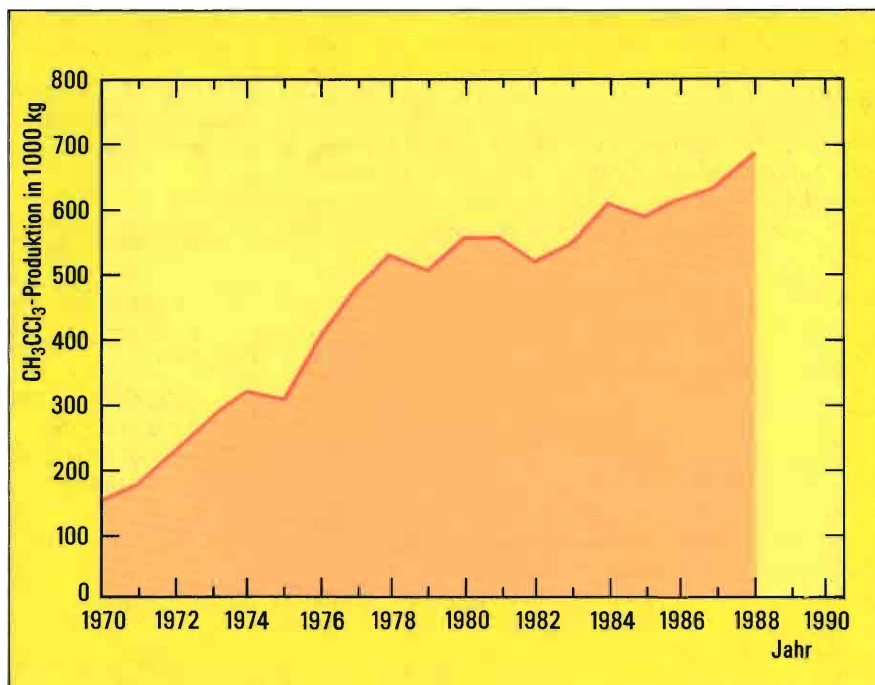


Abb. 12: Jährliche CH<sub>3</sub>CCl<sub>3</sub>-Produktion im Zeitraum 1970 bis 1988 (35).

1990 festgelegt, die Produktion und den Verbrauch von CH<sub>3</sub>CCl<sub>3</sub> bis zum Jahr 2005 einzustellen (vgl. Kap. 5, Nr. 1.1.3).

### 3.3.2 Tetrachlorkohlenstoff (CCl<sub>4</sub>)

CCl<sub>4</sub> wird in der Bundesrepublik Deutschland nahezu ausschließlich zur Herstellung von FCKW 11 und 12 verwendet. Die direkt emittierte Menge ist deshalb vernachlässigbar. Es gibt Anzeichen dafür, daß CCl<sub>4</sub> in osteuropäischen Ländern, der Sowjetunion und der Dritten Welt als Feuerlöschmittel und Lösemittel eingesetzt wird. Die Verwendung von CCl<sub>4</sub> wird in der Bundesrepublik wegen der FCKW 11- und 12-Reduzierung ebenfalls zurückgehen. Da CCl<sub>4</sub> als Koppelprodukt bei der Chlorolyse anfällt (vgl. Nr. 1.1) besteht die Gefahr, daß diese Verbindung in noch größerem Umfang als bisher exportiert wird. Die im Juni 1990 beschlossene Verschärfung des Montrealer Protokolls sieht daher die Produktions- und Verbrauchseinstellung von CCl<sub>4</sub> bis zum Jahr 2000 vor (vgl. Kap. 5, Nr. 1.1.3).

## 4. FCKW-Ersatzstoffe

### 4.1 Allgemeines

FCKW werden wegen ihrer physikalischen und chemischen Eigenschaften, speziell ihrer Nichtentflammbarkeit und geringen Toxizität, in vielen Anwendungsbereichen eingesetzt (vgl. Nr. 3.1). Hinzu kommt, daß die FCKW einen geringen Preis und damit meist ein günstiges Preis-/Leistungsverhältnis haben. Dies erklärt den außerordentlich breiten Markt

für diese Stoffe und ihre Nutzung auch in solchen Bereichen, in denen Ausweichmöglichkeiten vorhanden sind.

Der niedrige FCKW-Preis ist möglich, weil mit Chlorkohlenwasserstoffen ein sehr preiswerter Ausgangsstoff zur Verfügung steht. Die verwendeten Chlorkohlenwasserstoffe stellen End- beziehungsweise Abfallprodukte verschiedener Chlorolyseprozesse dar, die Weiterverarbeitung zu FCKW vermeidet eine andere wahrscheinlich kostenintensivere Entsorgung.

Wegen des herrschenden internationalen Wettbewerbs sind FCKW-Hersteller und -Anwender nicht bereit, ohne staatlichen Zwang einseitig Verteuerungen FCKW-haltiger oder unter FCKW-Einsatz hergestellter Produkte in Kauf zu nehmen. Da außerdem zum Teil sehr unterschiedliche Angaben über den Stand der Forschungsarbeiten gemacht werden, setzen sich die Unternehmen dem Vorwurf aus, bei der Entwicklung und Einführung von Ersatzstoffen eine Hinhaltetaktik zu verfolgen. Gleichwohl ist die zügige Einführung umweltverträglicher Ersatzstoffe und -technologien notwendig.

Der Ersatz von FCKW in Produkten oder Verfahren ist selten durch einen direkten Stoffaustausch möglich, sondern erfordert vielmehr technische Weiterentwicklungen.

Die chemische Industrie strebt vorrangig die Verwendung anderer halogenerter Verbindungen anstelle der FCKW an. Demgegenüber ist die Enquete-Kommission der Auffassung, daß eine Reihe umweltverträglicherer, nicht halogenerter Ersatzstoffe und vor allem auch -technologien verfügbar beziehungsweise in der Entwicklung ist und eingeführt werden muß. Der Einsatz halogenerter Verbindungen ist daher nur

in bestimmten Ausnahmefällen und in sehr begrenztem Umfang sowie unter Ausschöpfung aller technischen Möglichkeiten zur Emissionsminderung zu verantworten.

Um eine Gefährdung der Umwelt auszuschließen, ist eine umfassende Bewertung der Alternativstoffe erforderlich, die neben dem Ozonerstörungspotential auch eine Reihe anderer Kriterien berücksichtigen muß.

Im einzelnen sollen FCKW-Ersatzstoffe folgende Anforderungen erfüllen:

- kein Beitrag zum Ozonabbau in der Stratosphäre;
- ein möglichst geringer Beitrag zur Verstärkung des Treibhauseffektes;
- ein möglichst geringer Energieaufwand bei der Anwendung der Ersatzstoffe und -verfahren sowie bei der Herstellung der Ersatzstoffe, so daß der Gesamtbeitrag zum Treibhauseffekt möglichst weitgehend unter dem des zu ersetzenden Stoffes liegt;
- geringe toxikologische und ökotoxikologische Risiken;
- Nachweis der technischen Gebrauchstauglichkeit.

Wann Ersatzstoffe verfügbar sind und eingeführt werden können, hängt von dem Ergebnis der Untersuchungsprogramme und von Hemmnissen bei der Markteinführung ab, die wiederum Einfluß auf Planung, Bau und Fertigstellung der Produktionsanlagen nehmen.

#### 4.2 Forschungsprogramme

In der Bundesrepublik arbeiten einzelne FCKW-Hersteller und -Anwender an der Entwicklung neuer Ersatzstoffe und -technologien. Zur finanziellen Förderung der Forschungsarbeiten hat der BMFT einen Förderschwerpunkt „Minderung von Halogenkohlenwasserstoff-Emissionen“ eingesetzt. Hierbei wird besonderes Gewicht auf die Entwicklung ökologisch und toxikologisch unbedenklicher Ersatzstoffe und Verfahren gelegt, die vergleichbare technische Wirksamkeit erzielen. Projekte, die den Einsatz von H-FCKW 22 vorsehen, werden wegen des Ozonerstörungs- und Treibhauspotentials nicht gefördert.

Die Förderung durch den BMFT berücksichtigt mittelfristig und längerfristig realisierbare technische Verbesserungen. In den Forschungsvorhaben werden sowohl die Möglichkeiten der FCKW- als auch der CKW-Minderung in den Anwendungsbereichen Reinigungs- und Lösemittel, Klima- und Kältetechnik sowie Kunststoffverschäumung untersucht. Die Stoffgruppe der CKW trägt durch die Verbindungen Tetrachlorkohlenstoff und Methylchloroform zur Ozonerstörung bei. Zahlreiche andere technisch bedeutende CKW sind hoch toxisch und krebserzeugend und haben ökotoxische Eigenschaften.

Insgesamt sind bis 1992 etwa 50 Millionen DM Fördermittel für Forschungs- und Entwicklungsvorhaben zur

Minderung von Halogenkohlenwasserstoff Emissionen vorgesehen.

In den FCKW-Anwendungsbereichen „Reinigung“, „Kälte-Klima“ und „Verschäumung“ werden derzeit folgende Forschungsvorhaben bearbeitet:

#### Reinigung

- Entwicklung neuer Flußmittel und Lötpasten zur Eliminierung von HKW in der Elektronikfertigung
- FCKW-freies Reinigen von Oberflächen, insbesondere von Glas – FCKW-freie Textilreinigung mit aromatenfreiem Schwebbenzin – Substitution von HKW (hauptsächlich FCKW) in der Metallreinigung

#### Kälte-Klima

- Optimierung von Ersatzkältemitteln und Kältemaschinenkomponenten Verbundvorhaben innerhalb des Deutschen Kälte- und Klimatechnischen Vereins:
- Flüssigkeitskühler mit Ammoniak
- Alternative Anlagenschaltung und Arbeitsstoffe
- Wärmeübergang an Rohrbündeln
- Wärmeübergang an Einzelrohren
- Strömungs- und Drosselverhalten von H-FCKW 123 und FKW 134a
- Wärmeleitfähigkeit und Öleinfluß neuer Kältemittel
- Eigenschaften von FKW 152a/134a
- FKW 152a in Verbindung mit FKW 23 oder FKW 134a als Alternative zu FCKW 12

#### Kunststoffverschäumung

- FCKW-freie Blähmittel zur Verschäumung von Polystyrol-Folien
- Rückgewinnung und umweltfreundliche Spaltung von FCKW
- Halogenfreier PUR-Schaum

Auf internationaler Ebene führen die größten FCKW-Hersteller folgende Forschungsprogramme durch:

- In der „Alternative Fluorocarbon Environmental Acceptability Study“ (AFEAS) werden die Umweltauswirkungen teilhalogener FCKW (H-FCKW 22, 123, 124, 141 b, 142 b) und FKW (FKW 125, 134 a, 152 a) untersucht. Schwerpunkte der Arbeit sind die Berechnung der Ozonerstörungspotentiale und Treibhauspotentiale sowie die Reaktion der Verbindungen in der Atmosphäre und die Umweltauswirkungen der Abbauprodukte.

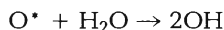
- Seit Dezember 1987 besteht das Toxizitätsprogramm „Program on Alternative Fluorocarbon Toxicity Testing I“ (PAFT I), in dem die Verbindungen H-FCKW 123 und FKW 134 a untersucht werden.
- Die Verbindung H-FCKW 141 b wird seit September 1988 in dem Toxizitätsprogramm PAFT II untersucht.
- PAFT III und IV führen Forschungsarbeiten über die Toxizität der Verbindungen H-FCKW 124 und FKW 125 sowie H-FCKW 225 durch.

### 4.3 Mechanismen und Folgeprodukte des chemischen Abbaus in der Atmosphäre

Ozonzerstörungspotential und Klimawirksamkeit sind allgemein Eigenschaften langlebiger Verbindungen, die sich in der Atmosphäre anreichern und damit erstens potentiell zur Infrarotstrahlungsbilanz der Troposphäre beitragen und zweitens – sofern sie chlorhaltig sind – potentielle Chlorlieferanten für die Stratosphäre sind. Ersatzstoffe wie H-FCKW und H-FKW sind wegen ihres Wasserstoffgehalts kurzlebiger und neigen deshalb weit weniger stark zur Akkumulation in der Atmosphäre. Ihr Ozonzerstörungspotential und ihre Klimawirksamkeit sind entsprechend kleiner (vgl. Nr. 2).

Langlebige Spurengase wie perhalogenierte Verbindungen (FCKW, Halone,  $\text{CCl}_4$  oder perfluorierte Alkane) werden ausschließlich in der Stratosphäre abgebaut. Dabei spielt die Photodissoziation durch das kurzwellige UV-Licht der Sonne die dominierende Rolle. Als generelle Regel gilt, daß sich die UV-Absorption von perhalogenierten Verbindungen in der Reihe Brom-Chlor-Fluor zu kürzeren Wellenlängen verschieben. Als Folge nehmen die photochemischen Verweilzeiten zu: Halone haben wegen des Bromgehalts eine kürzere Verweilzeit als zum Beispiel die Verbindung Tetrachlorkohlenstoff, die wiederum eine kürzere Verweilzeit als FCKW 11 oder FCKW 12 hat. Besonders langlebige Verbindungen sind die stark fluorhaltigen FCKW 114, 115 oder perfluorierte Verbindungen wie  $\text{CF}_4$  und seine höheren Analoga. Alle perhalogenierten Verbindungen, soweit sie Chlor und Brom enthalten, werden in der Stratosphäre auch durch Reaktionen mit elektronisch angeregten Sauerstoffatomen ( $\text{O}^*$ ) abgebaut.

Im Gegensatz zu den langlebigen Verbindungen werden kurzlebige Spurengase überwiegend bereits in der Troposphäre abgebaut. Voraussetzung hierfür ist, daß sie ausreichend mit Hydroxyl(OH)-Radikalen reagieren, die in diesem Bereich der Atmosphäre das einzig wichtige Abbaureagens darstellen. OH-Radikale werden gebildet durch Reaktionen von angeregten Sauerstoffatomen ( $\text{O}^*$ ) mit Wasser ( $\text{H}_2\text{O}$ )



wobei die  $\text{O}^*$ -Atome durch Photolyse des Ozons bei Wellenlängen unterhalb von 310 nm entstehen. Eine ausreichende Konzentration an  $\text{O}^*$ -Atomen, wie sie in der Stratosphäre existiert, kann in der Troposphäre aber nicht aufgebaut werden, da wegen des höheren

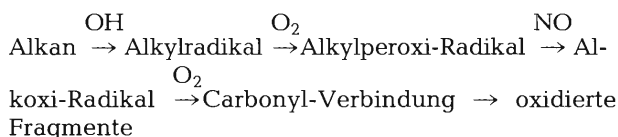
Gesamtdrucks angeregte Sauerstoffatome auch in Stößen mit Stickstoff- und Sauerstoffmolekülen schnell deaktiviert werden.

Hydroxyl-Radikale reagieren ausreichend stark nur mit wasserstoffhaltigen Verbindungen. Die treibende Kraft solcher Reaktionen ist die Ausbildung der starken HO-H-Bindung im Produktmolekül Wasser



Mit perhalogenierten Verbindungen führen dagegen solche Reaktionen nicht zu energetisch erlaubten Produkten; sie sind deshalb gegenüber OH-Radikalen praktisch stabil.

Die Abbaumechanismen von reinen Kohlenwasserstoffen wie Alkanen in der Troposphäre sind durch eine Vielzahl von direkten und indirekten Untersuchungen gut bekannt (37). Sie verlaufen nach dem Schema der Abbildung 13, das durch folgende Oxidationskette gekennzeichnet ist:



Das wesentliche hierbei ist die aufeinanderfolgende Oxidation der freien Radikale durch Stickstoffmonoxid (NO) und  $\text{O}_2$ , wobei NO zu Stickstoffdioxid ( $\text{NO}_2$ ) oxidiert wird, sowie die Ausbildung einer Carbonyl-Verbindung (wie zum Beispiel des Formaldehyds in der Oxidation des  $\text{CH}_4$ ) als erster „stabiler“ oxidiertes Form des Ausgangsmoleküls. Die Einzelschritte dieser Oxidationskette laufen erheblich schneller ab als die einleitende OH-Reaktion. Aus diesem Grunde ist die OH-Reaktion immer geschwindigkeitsbestimmend. Ihre Geschwindigkeitskonstante  $k_1$  und die mittlere OH-Konzentration  $[\text{OH}]$  bestimmen die Verweilzeit des Kohlenwasserstoffs, die sich als Mittelwert über Raum und Zeit des Ausdrucks  $(k_1[\text{OH}])^{-1}$  errechnet.

Partiell halogenierte Kohlenwasserstoffe wie H-FCKW und H-FKW werden grundsätzlich nach dem gleichen Schema wie die reinen Kohlenwasserstoffe oxidiert. Dies gilt uneingeschränkt für die ersten drei der vier Stufen der Reaktionskette:

- die Primärreaktion mit OH-Radikalen unter Bildung des halogenierten Alkylradikals:  
 $\text{OH} + \text{CHX}_3 \rightarrow \text{CX}_3 + \text{H}_2\text{O}$ ;
- die Rekombination des halogenierten Alkylradikals mit  $\text{O}_2$  unter Bildung des halogenierten Alkylperoxi-Radikals:  
 $\text{CX}_3 + \text{O}_2 \rightarrow \text{CX}_3\text{O}_2$ ;
- die Konversion des halogenierten Peroxi-Radikals in ein halogeniertes Alkyloxi-Radikal in Reaktion mit NO:  
 $\text{CX}_3\text{O}_2 + \text{NO} \rightarrow \text{CX}_3\text{O} + \text{NO}_2$ .

Auf der Stufe des Alkyloxi-Radikals tritt jedoch ein neuer Reaktionstyp auf. Während wasserstoffhaltige Oxi-Radikale wie zum Beispiel  $\text{CH}_3\text{O}$  nur mit  $\text{O}_2$  reagieren (unter Bildung von Aldehyd +  $\text{HO}_2$ ) und nicht durch Spaltung der C-H-Bindung, wird dieser Reak-

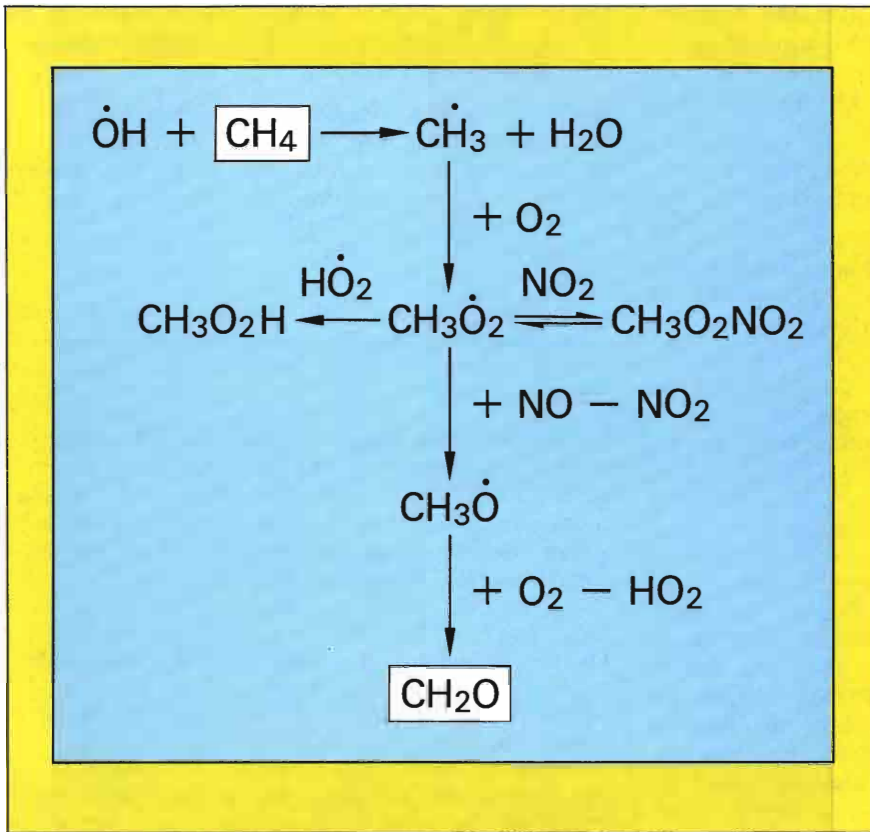


Abb. 13: Mechanismus der Oxidation von Kohlenwasserstoffen in der Troposphäre, demonstriert am Beispiel des Methans (CH<sub>4</sub>).

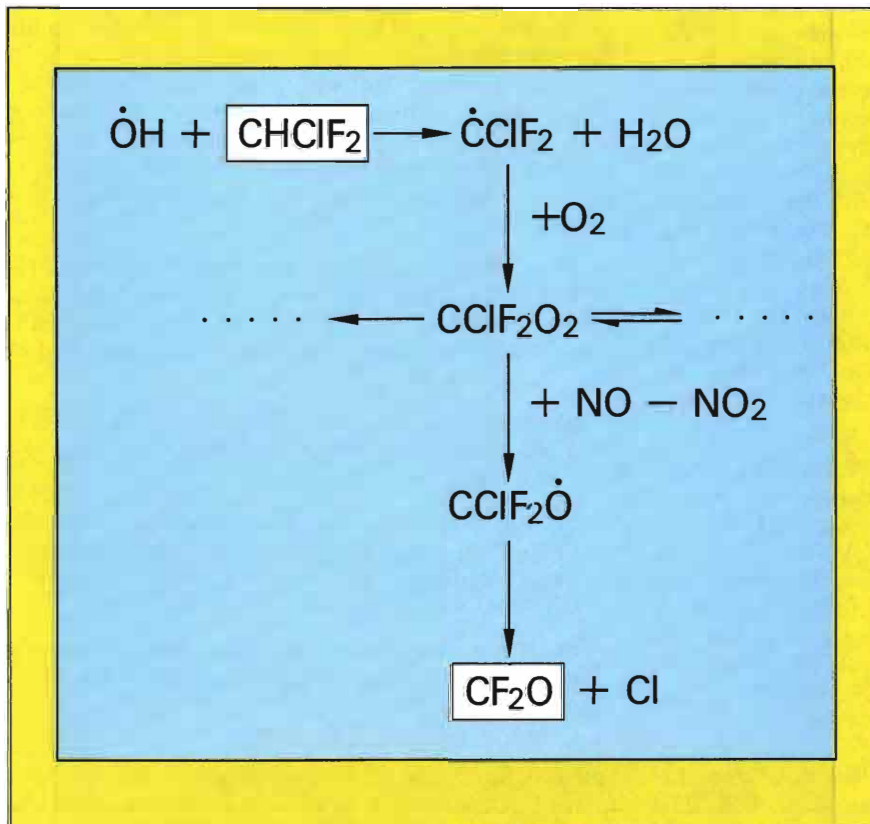


Abb. 14: Vermuteter Mechanismus der Oxidation von H-FCKW in der Troposphäre, demonstriert am Beispiel des H-FCKW 22.



tionstyp möglich, wenn H-Atome durch Halogene ersetzt sind. Als Folge reagieren halogenierte Oxi-Radikale unter atmosphärischen Bedingungen durch Spaltung der C-Cl-Bindung. In halogenierten C<sub>2</sub>-Kohlenwasserstoffen ist stattdessen auch die Spaltung der C-C-Bindung möglich. C-F-Bindungen dagegen können aus energetischen Gründen nicht gespalten werden. Der Mechanismus der Oxidation von H-FCKW in der Troposphäre ist in Abbildung 14 dargestellt.

Wie in Abbildung 14 zu erkennen ist, wird das Chloratom des H-FCKW 22 in dem Oxidationsprozeß eliminiert, während die Fluoratome in der oxidierten Form der Verbindung (CF<sub>2</sub>O) gespeichert bleiben. Das Chloratom reagiert anschließend mit CH<sub>4</sub>, CH<sub>2</sub>O oder HO<sub>2</sub>, wird dabei in Salzsäure (HCl) überführt und mit dem Regen aus der Troposphäre ausgewaschen. CF<sub>2</sub>O ist stabil gegenüber anderen Reaktanden, einschließlich der freien Radikale. Es wird in der Troposphäre vermutlich durch Hydrolyse in CO<sub>2</sub> und Flußsäure (HF) umgewandelt.

Die Mechanismen des Abbaus von anderen H-FCKW und der H-FKW in der Troposphäre sind zur Zeit noch wenig bekannt. Sie folgen vermutlich den oben genannten Regeln, das heißt es ist mit der Bildung von perhalogenierten Carbonylverbindungen wie CF<sub>2</sub>O, CClFO, CCl<sub>2</sub>O und CF<sub>3</sub>CClO zu rechnen. Inwieweit diese Verbindungen direkt aus der Troposphäre (zum Beispiel durch Hydrolyse) entfernt werden oder selbst weiteres Chlor in die Stratosphäre transportieren, ist zur Zeit noch nicht zu quantifizieren. Für die Untersuchung des chemischen Verhaltens von FCKW-Ersatzstoffen in der Atmosphäre besteht weiterer Forschungsbedarf.

#### 4.4 Anwendung möglicher Ersatzstoffe

##### 4.4.1 Teilhalogenierte FCKW

Teilhaletenierete Verbindungen enthalten im Gegensatz zu vollhalogenierten FCKW neben Kohlenstoff- und Halogenatomen auch Wasserstoffatome. Diese Wasserstoffatome bewirken, daß die Verbindungen zum größten Teil in der Troposphäre abgebaut werden und ein geringeres Ozonzerstörungs- und Treibhauspotential als die bisher eingesetzten FCKW haben. Die Ergebnisse der Toxizitätsprüfungen dieser Stoffe liegen bisher noch unvollständig vor, so daß die Verbindungen daher nicht abschließend bewertet werden können. Die diskutierten teilhalogenierten FCKW werden derzeit mit Ausnahme von H-FCKW 22 und 142 b nur in geringem Umfang hergestellt.

Ein verstärkter Einsatz teilhalogenerter H-FCKW ist wegen des Beitrages zum Treibhauseffekt und zur Ozonzerstörung nicht zu verantworten. Wie Tabelle 9 zeigt, liegen die emissionsbezogenen Treibhauspotentiale (GWP-Werte) der meisten heute als Ersatzstoffe für FCKW diskutierten H-FCKW noch deutlich über 1 000 (bei Zeithorizonten unter 100 Jahren), so daß mit einer entsprechenden Mengenausweitung ein nicht zu vertretender Klimateffekt verbunden wäre.

Daher dürfen diese Substanzen befristet und begrenzt nur dann eingesetzt werden, falls und solange nachweislich weder eine Ersatztechnik und ein Ersatzverfahren noch ein weniger ozon- und klimaunschädlicher sowie ökotoxikologisch weniger bedenklicher Ersatzstoff verfügbar ist (befristeter Erlaubnisvorbehalt).

##### – H-FCKW 22 (Chlordifluormethan, CHClF<sub>2</sub>)

Diese Verbindung wird seit Jahren großtechnisch hergestellt und als Kältemittel in der Kälte- und Klimatechnik verwendet (vgl. Nr. 3.1.4). Nach Aussagen der Industriegemeinschaft Aerosole (IGA) wird H-FCKW 22 im Aerosolbereich ausschließlich in PUR-Montageschaum eingesetzt (vgl. Nr. 3.1.5). Daneben wird dieser Stoff auch bei der Verschäumung verwendet.

H-FCKW 22 ist unter Standardbedingungen ein unbrennbares, farbloses und nahezu geruchloses Gas und hat nach einer Studie der Europäischen Chemischen Industrie, in der die bisherigen Ergebnisse zusammengefaßt werden, eine niedrige Toxizität (38). Obwohl H-FCKW 22 seit mehreren Jahren verwendet werde, seien Berichte über gesundheitsschädigende Wirkungen beim Menschen selten und in Übereinstimmung mit den tierexperimentellen Ergebnissen (39). Wegen der noch immer nicht vollständig geklärten Befunde im Hinblick auf eine kanzerogene Wirksamkeit sollte auf den Einsatz in Anwendungen, in denen dieser Stoff bestimmungsgemäß emittiert wird und Verbraucher ihm direkt ausgesetzt sind, verzichtet werden. Die in einigen Fälle schwer interpretierbaren Ergebnisse von Untersuchungen, die mutagene, karzinogene und reproduktionstoxikologische Wirkungen betreffen, sind wahrscheinlich auf Verunreinigungen durch Beimengungen der toxischen Verbindung FCKW 31 zurückzuführen. Zusätzlich ist nicht hundertprozentig geklärt, ob nicht auch H-FCKW 22 selbst möglicherweise ein mutagenes, kanzerogenes Potential hat (40). Bundesgesundheitsamt und Umweltbundesamt empfehlen, vor einem breiten Einsatz von H-FCKW 22 die fraglichen Befunde noch weiter abzuklären, da gegenwärtig ein gewisses Restrisiko bleibe.

##### – H-FCKW 123 (1,1-Dichlor-2,2,2-Trifluorethan, CHCl<sub>2</sub>CF<sub>3</sub>)

Diese Verbindung, die für technische Erprobung und Versuchszwecke bereits zur Verfügung gestellt wird, ist als Ersatz für FCKW 11 bei der PUR-Schaumstoffherstellung im Gespräch. Darüber hinaus kann H-FCKW 123 auch in einigen Fällen als Lösemittel eingesetzt werden. Nach Angaben der Hoechst AG wird die Entscheidung zum Bau einer H-FCKW 123-Anlage erst nach Vorliegen positiver Toxizitätsergebnisse, das heißt frühestens 1992/1993, getroffen. Die ersten Ergebnisse der Untersuchungen geben keine Hinweise auf eine signifikante Toxizität.

Die Kali-Chemie bereitet derzeit einen Antrag zur Genehmigung einer Anlage für die Produktion dieses Ersatzstoffes im Werk Bad Wimpfen vor.

– **H-FCKW 141 b (1,1-Dichlor-1-fluorethan, CH<sub>3</sub>CCl<sub>2</sub>F)**

H-FCKW 141 b wird auf seine Eignung als FCKW 11-Ersatzstoff bei der PUR-Schaumstoffherstellung, in der Kältetechnik und Elektronikreinigung untersucht. Das vollständige Ergebnis der toxikologischen Untersuchung wird ab 1992/1993 erwartet.

– **H-FCKW 124 (2-Chlor-1,1,1,2-Tetrafluorethan, CHFClCF<sub>3</sub>)**

Dieser Stoff wird auf seine Eignung als Kältemittel untersucht. Da H-FCKW 124 bisher nur im Labormaßstab hergestellt wird und die toxikologischen Untersuchungen sehr unvollständig sind, ist der Zeitpunkt seiner Verfügbarkeit noch ungewiß.

– **H-FCKW 142 b (1-Chlor-1,1-Difluorethan, CH<sub>3</sub>CClF<sub>2</sub>)**

H-FCKW 142 b wird bereits seit Jahren im europäischen Ausland hergestellt und kann als Kältemittel, als Treibmittel bei der Polystyrol-Verschäumung und in Spraydosen verwendet werden. Die Toxizitätsuntersuchungen geben keine Hinweise auf eine Bedenklichkeit der Verbindung.

– **H-FCKW 225 ca und 225 cb, C<sub>3</sub>HCl<sub>2</sub>F<sub>5</sub>**

Diese beiden Verbindungen werden als mögliche Ersatzstoffe für FCKW 113 im Lösemittelbereich diskutiert. Sie werden von der Ashai Glass Company Japan entwickelt und im Technikumsmaßstab hergestellt.

#### 4.4.2 Fluorkohlenwasserstoffe (FKW)

Der verstärkte Einsatz von Fluorkohlenwasserstoffen (FKW) ist wegen ihres Beitrages zum Treibhauseffekt nur für eine befristete Übergangszeit zu verantworten. Wie Tabelle 9 zeigt, liegen die emissionsbezogenen Treibhauspotentiale (GWP-Wert) der meisten heute als Ersatzstoffe für FCKW diskutierten FKW (zum Beispiel FKW 125 und 134a) deutlich über 1 000 (bei Zeithorizonten unter 100 Jahren), so daß mit einer entsprechenden Mengenausweitung ein nicht zu vertretender Klimateffekt verbunden wäre.

Daher dürfen diese Substanzen befristet nur dann eingesetzt werden, falls und solange nachweislich weder eine Ersatztechnologie oder ein Ersatzverfahren noch ein weniger ozon- und klimaunschädlicherer Ersatzstoff großtechnisch verfügbar ist (befristeter Erlaubnisvorbehalt).

– **FKW 134 a (1,1,1,2-Tetrafluorethan, CH<sub>2</sub>FCF<sub>3</sub>)**

FKW 134 a ist der erfolgversprechendste Ersatzstoff für FCKW 12 in der Kälte- und Klimatechnik. Nach Angaben der Hoechst AG ist mit dem Anlaufen der Produktion in der Bundesrepublik Deutschland für

diesen Stoff aber erst im Jahr 1993 zu rechnen (41). In anderen Staaten wird FKW 134a bereits produziert; eine kontinuierliche Ausweitung der Kapazitäten ist vorgesehen. Der Abschluß der toxikologischen Bewertung ist für den Zeitraum 1992/1993 vorgesehen. Die bisherigen Untersuchungen deuten auf eine sehr geringe Toxizität hin. Der Einsatz dieses Stoffes als Kältemittel ist von der Entwicklung eines mit FKW 134 a verträglichen Maschinenöls abhängig. Über den Stand der Forschungsarbeiten dazu werden zum Teil unterschiedliche Angaben gemacht. Erste Unternehmen planen, in Autoklimaanlagen und Haushaltsgeräten ab 1991 das Kältemittel 134a einzusetzen.

– **FKW 143 a**

FKW 143 a wird bisher nicht kommerziell hergestellt. Es ist brenn- beziehungsweise entflammbar und daher nur bei gegebenen Schutzeinrichtungen anwendbar. FKW 143 a wird als Alternative zu FCKW 12 in der Kälte- und Klimatechnik diskutiert. Ergebnisse von toxikologischen Untersuchungen sind bisher noch nicht veröffentlicht.

– **FKW 152 a (1,1-Difluorethan, CHF<sub>2</sub>CH<sub>3</sub>)**

FKW 152 a wird schon seit Jahrzehnten in der Kälte- und Klimatechnik als Bestandteil des Kältegemisches R 500 eingesetzt. Dieser Stoff wird von der Kälte- und Klimatechnik nur bedingt als geeigneter FCKW-Ersatzstoffe angesehen, weil es entflammbar ist (vgl. Nr. 3.1.4). Wegen der guten thermodynamischen Eigenschaften sowie der geringen Klimawirksamkeit ist eine breitere Anwendung dieses Kältemittels anzustreben.

– **FKW 23 (Trifluormethan, CHF<sub>3</sub>)**

FKW 23 wird in geringen Mengen in der Kältetechnik zur Erzeugung tiefer Temperaturen benötigt und bereits industriell hergestellt.

– **FKW 125 (Pentafluorethan, F<sub>2</sub>HC-CF<sub>3</sub>)**

FKW 125 wird als möglicher Ersatzstoff im Bereich der Kälte- und Klimatechnik, unter anderem für H-FCKW 22, diskutiert. Dieser Stoff wird nicht industriell hergestellt; toxikologische Untersuchungen werden im Rahmen des PAFT III Programms (vgl. Nr. 4.2) durchgeführt.

#### 4.4.3 Perfluorierte Alkane

Perfluorierte Alkane (C<sub>n</sub>F<sub>2n+2</sub>) sind flüchtige, chemisch inerte, nicht brennbare Verbindungen. Wegen ihrer physikalischen Eigenschaften sind die C<sub>4</sub>-C<sub>6</sub>-Analoge dieser Verbindungsklasse grundsätzlich auch potentielle Ersatzstoffe für FCKW in der Kälte- und Klimatechnik. Da sie kein Chlor enthalten, sind sie nicht ozonwirksam.

Perfluorierte Alkane sind in der Troposphäre stabil gegenüber allen Oxidantien. Darüber hinaus absorbieren sie nur im kurzwelligen UV-Bereich (unterhalb von 200 nm), so daß sie in der Troposphäre auch photochemisch stabil sind und erst in großen Höhen (oberhalb von 30 km) merklich zersetzt werden. Es ist davon auszugehen, daß ihre atmosphärischen Verweilzeiten mehrere 100 Jahre betragen.

Im Gegensatz zur UV-Absorption verfügen perfluorierte Alkane über starke IR-Absorptionen im Bereich des atmosphärischen Fensters. Zum Beispiel beträgt die integrale IR-Bandenstärke für Perfluorpentan (C<sub>5</sub>F<sub>12</sub>) etwa 4 000 atm<sup>-1</sup>cm<sup>-2</sup>, vergleichbar mit FCKW 114 oder FCKW 115. Gemeinsam mit der langen atmosphärischen Verweilzeit ist deshalb mit Treibhauspotentialen (GWP-Werten) zu rechnen, die das des FCKW 11 um nahezu einen Faktor 10 übersteigt. Perfluorierte Alkane sind deshalb aus Sicht ihrer Klimawirksamkeit als Ersatzstoffe für FCKW nicht akzeptabel. Die einfachste Verbindung dieser Stoffklasse, CF<sub>4</sub> (F14), ist in der Atmosphäre nachgewiesen und zeigt einen Konzentrationsanstieg von zwei bis drei Prozent pro Jahr. F14 wird bei der Aluminiumverhüttung emittiert.

#### 4.4.4 Halogenfreie Verbindungen

Halogenfreie Ersatzstoffe für FCKW, wie verschiedene Alkane, Ketone und Alkohole, werden großtechnisch für unterschiedliche Verwendungen produziert. Von besonderer Bedeutung sind Propan und Butan als Treibmittel für Spraydosen und Pentan als Treibmittel zur Verschäumung von Polyurethan- und Polystyrol-Kunststoffen. Neben den halogenfreien organischen Verbindungen wie Propan, Butan, Pentan, Dimethylether, Aceton, Isopropanol und anderen, die brennbar sind und in der Regel nur in geschlossenen oder gekapselten, explosionsgeschützten Anlagen verwendet werden können, stehen für einige Anwendungsbereiche die Ersatzstoffe Kohlendioxid, Stickstoff und Helium zur Verfügung.

### 4.5 Hemmnisse der Markteinführung für Ersatzstoffe

#### 4.5.1 Kosten

Der Beitrag der FCKW zu den Kosten des Endprodukts ist sowohl bei den mit FCKW hergestellten als auch bei den FCKW-haltigen Produkten sehr gering und dürfte daher kein Markteinführungshemmnis darstellen. Eine Ausnahme ist lediglich die Druckgaspackung. Die Endproduktpreise werden sich daher durch die Verwendung teurerer Ersatzstoffe nur geringfügig ändern. Das Beispiel der Haushaltskühlschränke verdeutlicht dies: Ein Gerät enthält im Kältemittel und Isolationsschaum zusammen etwa 400 Gramm FCKW. Die Kosten für diese FCKW-Menge betragen etwa 2,- DM, so daß die Verwendung eines zehnmal teureren Ersatzstoffes lediglich eine Preissteigerung von etwa zwei bis drei Prozent des Endverkaufspreises bewirken würde. Nicht berücksichtigt sind hier Mehrkosten, die durch eventuell nötige tech-

nische Änderungen entstehen. Es wird angenommen, daß die Herstellungskosten halogenerter Ersatzstoffe mit zunehmender Produktionsmenge deutlich abnehmen werden.

#### 4.5.2 DIN

Die DIN „Schaumkunststoffe als Dämmstoffe für das Bauwesen“ (DIN 18164) definiert unter „Dämmstoffe aus Polyurethan-Hartschaum“ solche, die „unter Mitwirkung von Halogenkohlenwasserstoffen als Treibmittel durch chemische Reaktion von Polyisocyanaten mit aciden, Wasserstoff enthaltenden Verbindungen und/oder durch Trimerisierung von Polyisocyanaten erzeugt werden“. Darunter fällt nur das Treibmittel FCKW 11. Das bedeutet, daß ein PUR-Hartschaum ohne FCKW 11 der DIN nicht entspricht und damit nicht automatisch eine allgemeine bauaufsichtliche Zulassung hat. Vielmehr bedarf sein Einsatz einer relativ aufwendigen und zeitraubenden Einzelzulassung durch die Bauaufsicht.

Diese DIN stellt somit ein Hindernis bei der FCKW-Substitution dar, weil der Einsatz von Substituten erschwert und verzögert wird. Beispielsweise wurde einem Unternehmen, daß FCKW-freien PUR-Dämmstoff herstellt aufgrund der DIN-Norm 18164 die Zulassung verwehrt (42). Es ist auf eine Änderung der bestehenden DIN mit dem Ziel hinzuwirken, daß PUR-Hartschäume, deren Wärmeleitfähigkeit und andere Eigenschaft mit denen FCKW-geschäumter Materialien vergleichbar sind, ebenfalls eine Zulassung erhalten.

### 5. Literaturverzeichnis

- (1) Hoechst AG: Schreiben an den Vorsitzenden der Enquete-Kommission vom 12.8.1988
- (2) BT-Drucksache 11/4133: Erste Beschlußempfehlung und Bericht des Ausschusses für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit zu dem Ersten Zwischenbericht der Enquete-Kommission „Vorsorge zum Schutz der Erdatmosphäre“. Bonn, 8.03.1989
- (3) Chemical Manufactures Association (CMA), Fluorocarbon Programm Panel: 1988 Production and Sales of Chlorofluorocarbons 11 and 12. October 1989
- (4) Chemical Manufactures Association 1989
- (5) Chemical Manufactures Association 1989
- (6) Umweltbundesamt: Berichte 7/89 „Verzicht aus Verantwortung: Maßnahmen zur Rettung der Ozonschicht“, Erich Schmidt Verlag Berlin 1989, S. 66 ff
- (7) Umweltbundesamt 1989, S. 66
- (8) Fraunhofer – Institut für Systemtechnik und Innovationsforschung, Karlsruhe, G. Angerer: Halone – Verwendung, Freisetzung, Emissionsminderung. FhG/ISI-Vorhaben 104930, 1988, S. 6
- (9) Fraunhofer – Institut für Systemtechnik und Innovationsforschung, Karlsruhe, G. Angerer: 1988, S. 7
- (10) Fraunhofer – Institut für Systemtechnik und Innovationsforschung, Karlsruhe, G. Angerer: 1988, S. 10
- (11) Umweltbundesamt 1989, S. 155

- (12) Ramanathan, V.; R. Cicerone; H. Singh und J. Kiehl: Trace gas trends and their potential role in climatic change. *J. Geophys. Res.*, 90, 1985, S. 5547-5566
- (13) WMO: Scientific Assessment of Stratospheric Ozone. 1989, Volume 1: World Meteorological Organization; Global Ozone Research and Monitoring Project. Report No. 20, 1, 1990, S. 424 ff
- (14) WMO/UNEP Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC): Bericht der Arbeitsgruppe I „Scientific Assessment of Climate Change“. Shine, K. u. a.: Draft report. März 1990
- (15) WMO 1990, S. 430
- (16) WMO 1990, S. 448
- (17) WMO 1990, S. 432
- (18) Ramanathan, V.: Climate-Chemical Interactions and Effects of Changing Atmospheric Trace Gases. *Reviews of Geophysics*, 25, 7, 1987, S. 1441-1482
- (19) WMO/UNEP, IPCC 1990
- (20) WMO/UNEP, IPCC 1990
- (21) WMO/UNEP, IPCC 1990
- (22) WMO 1990, S. 246
- (23) Fisher, D.A.; C.H. Hales; W.-C. Wang, M.K.W. Ko und N.D. Sze: Model calculations of the relative effects of CFCs and their replacements on globale warming. *Nature*, 34, 1990, S. 513-516
- (24) WMO 1990, S. 246
- (25) WMO/UNEP, IPCC, 1990
- (26) WMO 1990, S. 247 ff
- (27) Lal, S.; R. Borchers; P. Fabian und B.C. Kruger: Increasing abundance of  $\text{CF}_2\text{BrCl}$  in the atmosphere. *Nature*, 316, 1985, S. 135-136
- (28) Umweltbundesamt 1989, S. 89
- (29) Mündliche Stellungnahme der Thanex Chemie anlässlich der öffentlichen Anhörung „Ozonabbau in der Stratosphäre, Erkenntnisse, Auswirkungen, FCKW-Ausstieg und die Folgen“, 4. Mai 1990
- (30) Schriftliche Stellungnahme Degussa AG anlässlich der öffentlichen Anhörung „Ozonabbau in der Stratosphäre, Erkenntnisse, Auswirkungen, FCKW-Ausstieg und die Folgen“, in EK-Drucksache 11/135, 4. Mai 1990, S. 49-86
- (31) Schriftliche Stellungnahme Zeolith-Technologie GmbH anlässlich der öffentlichen Anhörung „Ozonabbau in der Stratosphäre, Erkenntnisse, Auswirkungen, FCKW-Ausstieg und die Folgen“, in EK-Drucksache 11/137, 4. Mai 1990, S. 182-190
- (32) Umweltbundesamt 1989, S. 146
- (33) Industrial Economics: Halon Usage and Emissions 1987
- (34) Schriftliche Stellungnahme von T. Pröbldorf anlässlich der öffentlichen Anhörung „Ozonabbau in der Stratosphäre, Erkenntnisse, Auswirkungen, FCKW-Ausstieg und die Folgen“, in EK-Drucksache 11/137, 4. Mai 1990, S. 48-51
- (35) Midgley, P.M.: The Production and release to the atmosphere of 1,1,1 Trichloroethane (Methyl Chloroform). *Atmospheric Environment*, 23, 12, 1989, S. 2663-2665
- (36) Midgley, P.M. 1989
- (37) Zellner (1987)
- (38) ECETOC: Joint Assessment of Commodity Chemicals, 9, Chlorodifluoromethane, CAS: 75-45-6, 1989
- (39) Ecetoc 1989, S. 3
- (40) Mündliche Stellungnahme von D. Kayser, Bundesgesundheitsamt, anlässlich der öffentlichen Anhörung „Ozonabbau in der Stratosphäre, Erkenntnisse, Auswirkungen, FCKW-Ausstieg und die Folgen“, 4. Mai 1990
- (41) Schriftliche Stellungnahme von W. Scholten, Hoechst AG, anlässlich der öffentlichen Anhörung „Ozonabbau in der Stratosphäre, Erkenntnisse, Auswirkungen, FCKW-Ausstieg und die Folgen“, in EK-Drucksache 11/137, 4. Mai 1990, S. 35-41
- (42) BT-Drucksache 11/7119 Antwort der Bundesregierung auf die kleine Anfrage der Abg. Fr. Garbe und der Fraktion DIE GRÜNEN: Zwang zum Einsatz von FCKW durch DIN-Normen, Bonn 30.05.1990

## 6. Tabellenverzeichnis

- Tab. 1: FCKW-Hersteller, die FCKW 11 und 12 Produktionsdaten an die Chemical Manufacturers Association (CMA) melden.
- Tab. 2: FCKW-Produktions-, Import- und Exportmenge im Jahr 1989 in der EG.
- Tab. 3: Verbrauch vollhalogener FCKW in der Bundesrepublik im Jahr 1986.
- Tab. 4: Summe der Halon 1211, 1301 und 2402 Produktions-, Import und Exportmenge im Jahr 1989 in der EG.
- Tab. 5: Weltweiter Halonverbrauch im Jahr 1986.
- Tab. 6: Verweilzeit, Emissionsmenge sowie Ergebnisse von ODP- und GWP-Berechnungsmodellen für FCKW, H-FCKW und die Verbindungen Tetrachlorkohlenstoff und Methylchloroform bezogen auf die Referenzverbindung FCKW 11.
- Tab. 7: Ozonerstörungspotential (ODP-Wert) und Bromozonerstörungspotential (BODP-Wert) für verschiedene Halone, berechnet nach dem 1-D- und 2-D-Modell.
- Tab. 8: Maximales emissionsbezogenes Chlorbelastungspotential (CLP-Wert) für verschiedene FCKW, H-FCKW, FKW und andere Verbindungen.
- Tab. 9: Emissionsbezogene Treibhauspotentiale (GWP-Werte), bezogen auf 1 Kilogramm Emission relativ zu  $\text{CO}_2$  im Gleichgewichtszustand für verschiedene Zeithorizonte.
- Tab. 10: Konzentrationsbezogener GWP-Wert verschiedener FCKW, H-FCKW, FKW sowie der Verbindungen Tetrachlorkohlenstoff und Methylchloroform pro Molekül.
- Tab. 11: Erhöhung der spezifischen Oberflächentemperatur, die aus 1 ppb des jeweiligen Gases resultiert.
- Tab. 12: Konzentrationen, globaler Anstieg der Konzentrationen und Verweilzeiten verschiedener Gase in der Troposphäre.
- Tab. 13: FCKW-Verbrauch bei der Schaumproduktion im Jahr 1986.
- Tab. 14: FCKW-Verbrauchsmenge in Spraydosen im Zeitraum von 1976 bis 1989 in der Bundesrepublik Deutschland.
- Tab. 15: Jährliche Verkaufsmenge von  $\text{CH}_3\text{CCl}_3$  in verschiedenen geographischen Breiten.

## 7. Abbildungsverzeichnis

- Abb. 1: Herstellungsverfahren von FCKW 11 und 12 sowie von H-FCKW 22.
- Abb. 2: Produktionsmenge von FCKW 11 und 12 im Zeitraum 1960 bis 1988 (a);

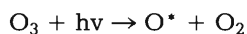
- Summe der Produktionsmenge von FCKW 11 und 12 in den verschiedenen Anwendungsbereichen im Zeitraum 1976 bis 1988 und Aufteilung auf die verschiedenen Anwendungsbereiche (b).
- Abb. 3: FCKW 11- und 12-Verkaufsmenge im Zeitraum 1931 bis 1988 in der Nord- und Südhemisphäre.
- Abb. 4: EG-Produktionsmengen der Verbindungen FCKW 11, 12, 113, 114 und 115 in den Jahren 1987, 1988 und 1989.
- Abb. 5: Entwicklung des jährlichen Halonverbrauchs in der EG.
- Abb. 6: Entwicklung des kumulierten Haloninventars in Feuerlöschanlagen und -geräten in der EG.
- Abb. 7: Relative Ozonzerstörung durch teilhalogenierte Verbindungen in Abhängigkeit der Zeit.
- Abb. 8: Absorptionsspektren verschiedener Spurengase in der Atmosphäre.
- Abb. 9: GWP-Werte verschiedener FCKW, H-FCKW und FKW relativ zu CO<sub>2</sub>.
- Abb. 10: Konzentrationsanstieg der FCKW 11, 12, 113 und H-FCKW 22 sowie der Verbindungen Tetrachlorkohlenstoff und Methylchloroform.
- Abb. 11: Verwendung der Halon-Feuerlöschmittel.
- Abb. 12: Jährliche CH<sub>3</sub>CCl<sub>3</sub>-Produktion im Zeitraum 1970 bis 1988.
- Abb. 13: Mechanismus der Oxidation von Kohlenwasserstoffen in der Troposphäre, demonstriert am Beispiel des Methans (CH<sub>4</sub>).
- Abb. 14: Vermuteter Mechanismus der Oxidation von H-FCKW in der Troposphäre, demonstriert am Beispiel des H-FCKW 22.

### 3. KAPITEL

## Modellabschätzungen zum Ausmaß zukünftiger Veränderungen

### 1. Grundlagen

Die außerordentliche Bedeutung des atmosphärischen Ozons liegt nicht nur in seinem Vermögen, den biologisch schädlichen UV-B-Anteil der Sonnenstrahlung zu absorbieren, sondern auch darin, daß bei diesem Prozeß energetisch angeregte und hochreaktive Sauerstoffatome (O<sup>\*</sup>) gebildet werden:



Diese reagieren unter anderem mit Lachgas (N<sub>2</sub>O)



und Wasserdampf (H<sub>2</sub>O)



und bilden Stickstoffmonoxid(NO)- und Hydroxyl(OH)-Radikale. Der erste Prozeß ist hauptsächlich verantwortlich für die Bildung der Stickoxide in der Stratosphäre, welche dort die Konzentration des Ozons in hohem Maße mitbestimmen. Der zweite Prozeß ist von größter Bedeutung in der Troposphäre, da die OH-Radikale verantwortlich sind für den ersten Schritt zur Oxidation der meisten natürlichen und anthropogenen Gase in der Atmosphäre. Das Ozon hat daher sowohl in der Stratosphäre als auch in der Troposphäre großen Einfluß auf die allgemeine Chemie der Atmosphäre. Die Absorption der UV-Strahlung und eines Teils des sichtbaren Sonnenlichts durch Ozon bestimmt in hohem Maße auch die Temperatur in der Stratosphäre, die wiederum die Geschwindigkeit anderer chemischer Reaktionen beeinflussen, welche die Ozonverteilung mitbestimmen. Da außerdem die Energiezufuhr durch die UV-Strahlung die Winde —

und damit den Ozontransport — in der Stratosphäre bestimmt und das Ozon in Stratosphäre und Troposphäre durch Absorption und Emission von Infrarotstrahlung auch für das Klima der Erde von großer Bedeutung ist, ist der Kreislauf dieses Moleküls Teil eines stark gekoppelten Systems, welches nur mit Hilfe von Modellberechnungen einigermaßen übersichtlich behandelt werden kann.

#### 1.1 Ein-, zwei- und dreidimensionale (1-D-, 2-D- und 3-D-) Modelle

Wegen der Komplexität des Systems müssen erhebliche Vereinfachungen eingeführt werden, da die Rechnerkapazität für eine adäquate Behandlung des Gesamtproblems bei weitem noch nicht vorhanden ist. Entweder betont man deshalb im Augenblick mehr die photochemischen und Strahlungsprozesse und vereinfacht dabei die Transportprozesse stark, oder umgekehrt. Das erste Verfahren wird besonders in eindimensionalen (1-D-)Modellen verfolgt. In ihnen wird versucht, die auf Horizontal- oder Druckflächen gemittelten Spurenstoffkonzentrationen sowie in den meisten Modellen auch die Temperaturen und deren Wechselwirkung mit der Chemie zu berechnen. Da global gemittelt durch Druck- oder Horizontalflächen kein Nettotransport von Luftmassen stattfinden kann, werden die Transportvorgänge in solchen Modellen durch Einführung einer großräumigen Diffusion beschrieben, wobei der Auf- oder Abwärtstransport der chemischen Bestandteile als proportional zum Vertikalgradienten der global gemittelten Volumenmischungsverhältnisse angenommen wird. Die dabei verwendeten Proportionalitätsfaktoren (sogenannte Austauschkoefizienten) werden empirisch aus den großräumigen meteorologischen Verhältnissen und

aus global gemittelten Beobachtungen der Verteilungen einiger Spurenstoffe abgeleitet und für alle Gase verwendet. Die Ableitung dieser Koeffizienten wurde besonders durch Satelliten- und Ballonbeobachtungen von Ozon, Distickstoffoxid (N<sub>2</sub>O) und Methan (CH<sub>4</sub>) ermöglicht (1). Für „Feinabstimmungen“ im Bereich der Tropopause werden die Koeffizienten so angepasst, daß die historische Entwicklung der Spurengaskonzentration in der Troposphäre mit bekannten Emissionsdaten (zum Beispiel von FCKW 12) ungefähr richtig simuliert werden kann.

Der Vorteil der 1-D-Modelle liegt darin, daß sie eine detaillierte Behandlung der chemischen Prozesse ermöglichen und, wie es sich gezeigt hat, trotz der stark vereinfachten Behandlung der atmosphärischen Transportvorgänge die erste wichtige Näherung der stärksten räumlichen Variabilität der Spurengasverteilung, nämlich der mit der Höhe, relativ gut beschreiben können. Allerdings können die 1-D-Modelle jegliche andere Variabilität, sowohl räumlich wie zeitlich, nicht beschreiben. Die meisten Langzeitprognosen der Änderungen der Ozonverteilung in der Stratosphäre als Folge der Emissionen der FCKW und sonstiger Gase wurden mit Hilfe von 1-D-Modellen erreicht. (Beispiele für Modelle mit Temperaturreckkopplung vgl. 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 11). Die Hauptunterschiede zwischen den Modellen liegen in der Berechnung der Photolyseraten, der Transportparameter und der Temperatur. Auf die Methoden zur Berechnung der Temperaturen wird in Abschnitt C, Kapitel 2 und 4, sowie weiter unten in diesem Kapitel

am Beispiel des Mainzer Modells näher eingegangen.

Zweidimensionale (2-D-) gekoppelte Chemie-Transportmodelle versuchen zusätzlich, die Abhängigkeit der chemischen Verteilungen von den geographischen Breiten und den Jahreszeiten zu erfassen. Der numerische Aufwand ist deutlich höher als bei den 1-D-Modellen, aber dennoch werden auch sie, häufig mit Berücksichtigung von Temperaturreckkopplungen in der Stratosphäre, inzwischen zu einem weit verbreiteten Hilfsmittel für Szenarienrechnungen (12). In den 2-D-Modellen werden Transportprozesse hauptsächlich durch mittlere Winde in meridionaler (Süd-Nord) und vertikaler Richtung beschrieben, die sich aus der Energie- und Massenbilanz (Wärme- und Kontinuitätsgleichungen), basierend auf Beobachtungen, ergeben. Alle übrigen Beiträge zum Transport, wie zum Beispiel die Auswirkung unterschiedlicher Winde in Abhängigkeit von der geographischen Länge, werden ähnlich wie in den eindimensionalen Modellen mit (zwei-dimensionalen) Diffusionsansätzen parametrisiert. Die berechneten meridionalen Verteilungen der chemischen Parameter entsprechen also Mittelwerten rund um die Erde entlang eines Längengrades für die unterschiedlichen geographischen Breiten und die Höhen über dem Erdboden. 2-D-Modelle beschreiben auch die Effekte von Spurengasemissionen kürzerer atmosphärischer Verweilzeit in der Troposphäre, wie zum Beispiel der Stickoxide (NO<sub>x</sub>) und des Kohlenmonoxids (CO), besser als 1-D-Modelle, weil sie bereits angenähert einen loka-

Tabelle 1

**Einige 2-D-Chemie-Transportmodelle und deren Eigenschaften:  
Rückkopplungsprozesse in der Stratosphäre, Erfassung von Chemie in der Troposphäre**

Institut	Referenz	Temperatur	Winde	Troposphäre
Universität Oslo .....	14	variabel	fest	ja
Oxford/Cambridge .....	15	variabel	variabel	ja
MPI Mainz .....	16	fest	fest	ja
Clarkson Universität, USA .....	17	fest	variabel	ja
Du Pont .....	18, 19	fest	fest	ja
NASA Goddard Space Flight Center .....	z. B. 20	beides	beides	ja
Lawrence Livermore National Laboratory .....	z. B. 21	fest	variabel	ja
AER Cambridge, USA .....	22	fest	fest	teilweise
	23 *)	variabel	fest	teilweise
	24 **)	variabel	variabel	ja
National Center for Atmospheric Research, Boulder, USA .....	25	variabel	variabel	nein
	26	variabel	variabel	ja

In den letzten drei Modellen und in den davon abgeleiteten Modellen können sich Temperaturen und mittlere Zirkulation in der Stratosphäre im Einklang mit Änderungen in der Ozonverteilung und anderen die Erwärmungsraten beeinflussenden Spurengasen ändern und umgekehrt, das heißt diese Modelle sind selbstkonsistent.

\*) Enthält einfaches Klimamodell für drei Breitenzonen mit Jahreszeiten und Ozean

\*\*) Extrem vereinfachte Chemie

len Abbau in der Nähe der Hauptemissionsgebiete erfassen. Bekanntlich entstehen die anthropogenen Emissionen von  $\text{NO}_x$  vorwiegend in den mittleren Breiten der Nordhalbkugel.

Auch zweidimensionale Modelle unterscheiden sich untereinander am stärksten in der Behandlung von Transportprozessen, also der Art der mittleren Zirkulation und des Koordinatensystems, sowie bei der Berechnung der Photolyseraten. Beispiele hierzu, die in einem NASA-Report (13) näher beschrieben wurden, sind in Tabelle 1 zusammengestellt.

Als Beispiel für die Resultate eines 2-D-Modells zeigt Abbildung 1 die im Rahmen eines Projekts des Umweltbundesamtes (27) mit dem Modell der Universität Oslo (28) berechneten Ozonverteilungen in verschiedenen geographischen Breiten für das Jahr 1985. Zum Vergleich ist auch die mit dem Mainzer 1-D-Modell (29) berechnete mittlere Ozonverteilung eingetragen, die gut mit global gemittelten Werten des 2-D-Modells übereinstimmt. Wie Abbildung 1a und 1b zeigt, geben die Kurven in etwa die typischen beobachteten Profile wieder. Für weitere Vergleiche des Osloer Modells mit Beobachtungen vgl. (30).

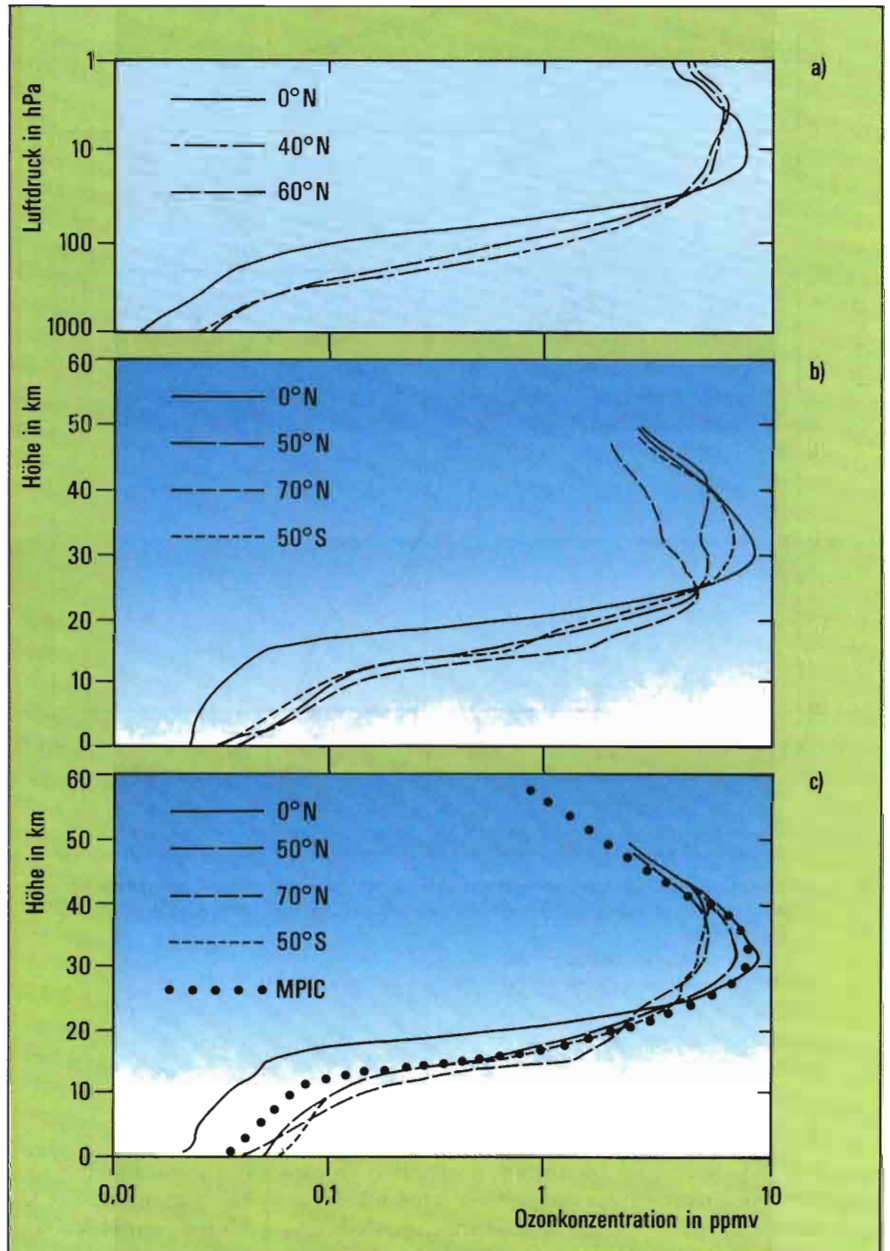


Abb. 1: Beobachtete und mit dem 2-D-Modell der Universität Oslo berechnete Höhenverteilungen der Ozonkonzentration für verschiedene Breiten und zwei Jahreszeiten.

Teil a: Beobachtungen für Januar 1963 bis 1974 (31)

Teil b: Modell für Januar 1985

Teil c: Modell für Juli 1985

Die Punkte sind die mit dem Mainzer 1-D-Modell berechneten Werte.

Man beachte, daß die beobachteten Profile auf Druckniveau und die berechneten Profile auf Höhenniveau definiert sind. Die Umrechnung ist abhängig vom Temperaturprofil.

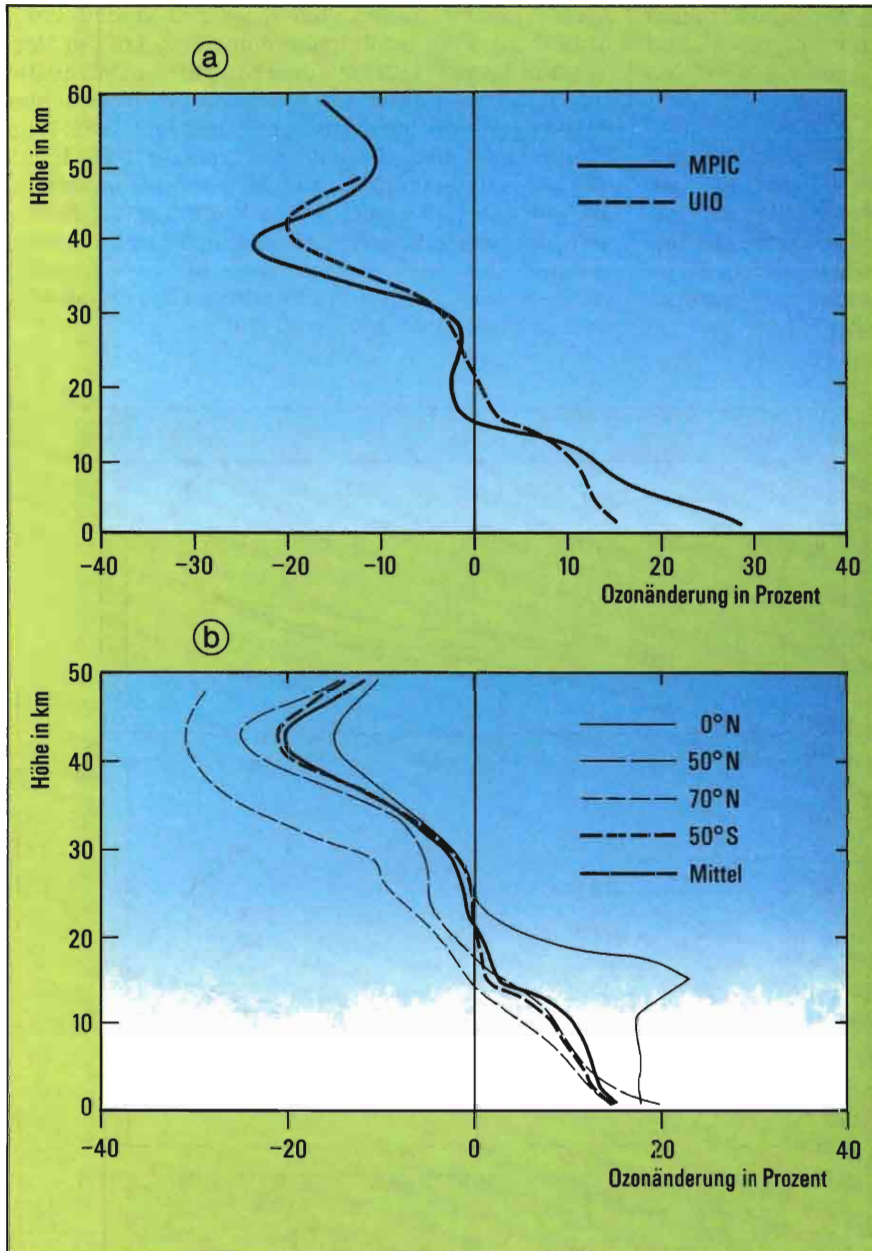


Abb. 2: Mit dem Osloer (UIO) und dem Mainzer (MPIC) Modell berechnete Ozonkonzentrationsänderungen für das Jahr 2050 in einem ‚Montreal‘-Szenario, ohne Anstieg der H-FCKW 22 Produktion.

Teil a: Vergleich der globalen Mittel,

Teil b: Breitenabhängigkeit der berechneten Änderungen im Nordwinter.

Auch bei den Szenarienrechnungen erhält man akzeptable Übereinstimmung der berechneten mittleren Ozonänderung in der Stratosphäre zwischen dem Osloer 2-D-Modell und dem Mainzer 1-D-Modell, wie aus Abbildung 2 ersichtlich ist. Das gezeigte Szenario der FCKW-Reduzierung nach dem Montrealer Protokoll (vgl. Nr. 3.2) ist in Brühl und Hennig (32) definiert. Aus diesem Grund ist die Verwendung von 1-D-Modellen zur groben Abschätzung der Effekte von bestimmten Maßnahmen auf Ozon und Klima in umfangreichen Szenarienrechnungen sinnvoll.

Als Zwischenstufe zwischen 1-D- und 2-D-Modellen kann man das am Max Planck Institut für Chemie in Mainz entwickelte „1½-D“-Modell betrachten, in welchem die beiden Hemisphären separat nach 1-D-Art behandelt werden, wobei ein Horizontalaustausch zwischen den beiden Hemisphären zugelassen wird. Dieses Modell hat besonders für Simulationen von Vorgängen in der Troposphäre große Anwendungsmöglichkeiten, da es die sehr unterschiedlichen anthropogenen Emissionen und Einflüsse des Ozeans auf Chemie und Klima separat behandeln kann. Es



sollte hierbei erwähnt werden, daß keines der oben angeführten Modelle solche Anwendungen für Klimaszenarien mit Troposphärenchemie zuläßt. Die Szenarienberechnungen in Nr. 3.2 sind mit dem 1½-D-Modell erstellt worden. Als Beispiele werden dieses Modell und das Osloer Modell in Nr. 3.1.2 näher beschrieben.

Bei dreidimensionalen (3-D-)Modellen entfällt auch die Mittelung entlang der Längenkreise. Hier werden die mittleren Winde entweder aus Beobachtungen abgeleitet (zum Beispiel (33)) oder aus prognostischen und diagnostischen Beziehungen berechnet. 3-D-Modelle erfordern wegen des sehr hohen numerischen Aufwands starke Vereinfachungen bei Chemie und Strahlungstransport und werden deshalb zur Zeit nur für einige Spezialanwendungen verwendet. Eine aktualisierte Version des ersten 3-D-Chemiemodells (34) wurde zur Abschätzung der Lebensdauer des FCKW-Ersatzstoffs H-FCKW 123 verwendet (35). Neben dieser Simulation über wenige Jahre wurden 3-D-Modelle neuerdings auch für die Simulation des Transports von Spurenstoffen am Rande des Ozonlochs und für die Ausbreitung ozonarmer Luft in der Stratosphäre von höheren zu niedrigeren Breiten auf der Südhalbkugel benutzt (36, 37). 3-D-Modelle sind aber zur Zeit noch nicht für Langzeituntersuchungen von chemischen und klimatischen Wechselwirkungen einsetzbar.

## 1.2 Beschreibung zweier Rechenmodelle

### 1.2.1 Das 1-D- und 1½-D-Chemie-Klimamodell des Max-Planck-Instituts für Chemie (MPIC)

Eine eingehende Beschreibung dieses Modells findet sich in Brühl und Crutzen (38). Der vom Modell erfaßte Höhenbereich erstreckt sich vom Boden bis in etwa 65 km Höhe. Auf 86 Druckniveaus mit einem Höhenabstand von je etwa 800 m werden die Jahresmittel der Temperatur und der Konzentrationen von 43 Gasen berechnet.

Für den Austauschkoefizienten wurde ein Höhenprofil gewählt, das in der Höhe der Tropopause in den Tropen ein Minimum von 0,4 m<sup>2</sup>/s hat, in der Stratosphäre fast exponentiell mit der Höhe zunimmt und in 40 km Höhe etwa 7 m<sup>2</sup>/s erreicht. In der Troposphäre, unterhalb etwa 10 km, ist der Koeffizient 10 m<sup>2</sup>/s. Die Vertikalverteilungen der langlebigen Quellgase, wie Methan (CH<sub>4</sub>), Distickstoffoxid (N<sub>2</sub>O) und der Halogenkohlenwasserstoffe werden mit einem Zeitschritt von fünf Tagen voll zeitabhängig gerechnet. Die Emissionen am Boden werden in Jahresschritten geändert. Die anderen Verbindungen werden jedes Jahr angepaßt, unter Berücksichtigung der Chemie und des Transports. Kurzlebige Verbindungen sind in Familien zusammengefaßt und stehen innerhalb dieser im photochemischen Gleichgewicht, das heißt, daß sie sich mit algebraischen Gleichungen berechnen lassen. Es gibt die Familie der reaktiven Sauerstoffverbindungen (wichtigste Bestandteile Ozon (O<sub>3</sub>), Sauerstoffatome im Grundzustand (O) und im angeregten Zustand (O\*)) und die Familie mit den aktiven Stickstoffverbindungen (unter anderem mit Stickoxiden (NO<sub>x</sub>) und Salpetersäure (HNO<sub>3</sub>)). Entsprechend sind

eine Wasserstoff-Familie, (die das Hydroxyl-(OH)-Radikal enthält), eine Chlor- oder ClX-Familie (wichtigste Substanzen Chlormonoxid (ClO), Chlorwasserstoff (HCl) und Chlornitrat (ClONO<sub>2</sub>)) und eine Brom- oder BrX-Familie (Hauptbestandteile Bromoxid (BrO) und HBr) definiert. Für diese Familien, aber nicht für die einzelnen Komponenten, werden sowohl Transport als auch chemische Quellen und Senken berücksichtigt. Insgesamt betrachtet man 113 photochemische Reaktionen und stützt sich bei der Berechnung der Reaktions- und Photolyseraten meist auf die Zusammenstellung von De More u. a. (39, 40).

Das Ausregnen in der Troposphäre und die Absorption (Trockendeposition) von Gasen an der Erdoberfläche werden berücksichtigt. In die Rechnungen zur Photochemie werden die Tagesmittelwerte der Photolyseraten eingesetzt; da man aber Transporte bei Tag und Nacht berücksichtigen muß, werden die turbulenten Transporte verdoppelt (41). Für sechs Sonnenstände werden Photolyseraten berechnet und daraus Tagesmittel gebildet. Dabei wurde angenommen, daß das globale Jahresmittel gut durch eine Rechnung an der Tag- und Nachtgleiche (21. März oder 23. September) bei einer geographischen Breite von 38° dargestellt werden kann. Für die Rechnung im UV und Sichtbaren wurden 176 Wellenlängenbereiche (spektrale Auflösung von 1 nm bei 300 nm) verwendet. Für Wellenlängen über etwa 202 nm wird mit einem auf der Strahlungsübertragungsgleichung basierenden effektiven Rechenverfahren (42) die Vielfachstreuung an Luftmolekülen, Aerosolteilchen und Wolkentropfen berücksichtigt. Die angenommene Bodenbedeckung beträgt 10,5 Prozent. Durch die Rückstreuung der solaren Strahlung aus der Troposphäre erhöhen sich die Photolyseraten in der unteren Stratosphäre.

Die Temperaturen in der Stratosphäre werden unter Annahme des Strahlungsgleichgewichts in Jahresritten neu bestimmt. Die Berechnung von Abkühl- und Erwärmungsraten von Kohlendioxid (CO<sub>2</sub>), Wasserdampf (H<sub>2</sub>O) und Ozon (O<sub>3</sub>) im Infraroten folgt dem Absorptionsbandenmodell von Ramanathan (43). Außerdem werden Methan (CH<sub>4</sub>), Distickstoffoxid (N<sub>2</sub>O), FCKW 12, FCKW 11 sowie FCKW 113 (44) und H-FCKW 22 (45) bei der Berechnung der Erwärmungsraten berücksichtigt. Aufheizung durch die Absorption von Sonnenstrahlung durch O<sub>3</sub> und Stickstoffdioxid (NO<sub>2</sub>) wird in derselben Art wie die entsprechenden Photolyseraten berechnet. Für die Wolken wird ein konstanter Bedeckungsgrad von 50 Prozent und eine Oberkante bei etwa fünf km Höhe (Druck: 538 hPa) angenommen. Die berechneten Temperaturhöhenprofile für die gegenwärtige Stratosphäre passen zu den beobachteten, global gemittelten Werten.

In der Troposphäre wird das Höhenprofil der relativen Luftfeuchtigkeit (in Bodennähe 77 Prozent) (46) festgehalten und auf diese Weise die Verstärkung des Treibhauseffektes durch den Anstieg der Wasserdampfkonzentrationen berücksichtigt. Die Temperaturen in der Troposphäre sind über einen druck- und luftfeuchtigkeitsabhängigen Gradienten (47) mit der Temperatur der Erdoberfläche verbunden, der für die heutigen Spurengaskonzentrationen ein Temperaturprofil liefert, das bis hinauf zu einer Höhe von 7 km in

sehr guter Übereinstimmung mit dem global gemittelten gemessenen Profil steht.

Die Temperatur an der Erdoberfläche  $T_s$  wird für jedes Jahr (global oder für jede Hemisphäre) über ein Iterationsverfahren aus der Energiebilanz berechnet:

$$E_n(T_s) + \tau F_o(T_s) = 0$$

$E_n$  ist hier der Nettofluß der Strahlungsenergie (solar und IR), der die Atmosphäre an ihrem Oberrand nach außen verläßt (also negativ ist bei dominierendem Treibhauseffekt) und mit dem Strahlungs-Konvektionsmodell berechnet wird.  $F_o$  ist der Wärmefluß in die Ozeane und  $\tau$  der Meeresanteil an der Erdoberfläche (global 71 Prozent). Wärmeflüsse im Meer bis zu einer Tiefe von 4 000 m werden durch einen Diffusionsansatz dargestellt, bei dem man für eine gut durchmischte Deckschicht von 100 m Dicke relativ große Diffusionskoeffizienten von  $2 \times 10^{-3} \text{ m}^2/\text{s}$  annimmt und für die Tiefen darunter einen Wert von  $1,7 \times 10^{-4} \text{ m}^2/\text{s}$ , der von Beobachtungen abgeleitet wurde.

Um relativ kurzlebige Gase besser erfassen zu können, wie zum Beispiel Stickoxide ( $\text{NO}_x$ ) und Kohlenmonoxid ( $\text{CO}$ ), die in entscheidendem Maße die Konzentration der Hydroxyl( $\text{OH}$ )-Radikale und damit die atmosphärische Konzentration des Methan ( $\text{CH}_4$ ) und teilhalogenierter FCKW beeinflussen, wird das Modell im allgemeinen für Nord- und Südhemisphäre parallel gerechnet. Der unterschiedliche Ozeananteil (Nordhemisphäre:  $\tau = 0,626$ , Südhemisphäre:  $\tau = 0,794$ ) wird bei den chemischen Prozessen und in der Energiebilanz berücksichtigt. Für den Austausch von langlebigen Gasen zwischen den Hemisphären wird in der Troposphäre eine Zeitkonstante von fünfzehn Monaten, in der Stratosphäre von fünf Monaten angenommen.

### 1.2.2 Das Modell der Universität Oslo (UIO)

Dieses Modell ist zweidimensional, das heißt, es beschreibt die über die Längengrade gemittelte Breiten- und Höhenverteilung von Gasen in der Atmosphäre und berücksichtigt die Jahreszeiten. Für eine eingehende Beschreibung des Modells vgl. (48, 49, 50, 51).

Das Modell erfaßt den Höhenbereich von 0 bis 50 km mit einer Höhenauflösung von zwei Kilometer. In nord-südlicher Richtung beträgt die Auflösung zehn Grad. Der mittlere (advective) Transport im Modell wird durch eine Zirkulation beschrieben, die aus mit Hilfe von Beobachtungen der heutigen Spurengasverteilung und Strahlungsberechnungen bestimmten Erwärmungsraten abgeleitet wurde und für die vier Jahreszeiten unterschiedlich ist. Temperaturänderungen aufgrund geänderter Spurengaskonzentrationen anthropogenen Ursprungs werden oberhalb von 20 km berücksichtigt. Diese beeinflussen jedoch nicht die Zirkulation, das heißt, daß das Modell nicht voll interaktiv ist.

Das Modell besteht aus zwei Teilen:

- a) Der Transport der langlebigen Spurengase wird mit einem Zeitschritt von einem Tag gerechnet.

- b) Die Berechnung des vollen Tagesgangs für die kurzlebigen Moleküle und die Berechnung der Produktions- und Verlustterme für die langlebigen Gase erfolgen einmal für jeden Monat. Tagsüber wird meist ein Zeitschritt von 15 Minuten verwendet, der sich allerdings um Sonnenauf- und Sonnenuntergang auf 1,5 Minuten verkürzt.

Die Photodissoziationsraten werden alle 15 Minuten berechnet. Das Rechnungsverfahren stützt sich auf die stark vereinfachte integrale Zweistrom-Methode (52). Die Verteilung der Gase innerhalb der Familien (Sauerstoff-, Wasserstoff-, Stickstoff-, Chlor-, und Brom-Familie) wird bei der Berechnung des Tagesgangs bestimmt. Das Modell dürfte daher die Tag- und Nachtchemie in Troposphäre und Stratosphäre zutreffend beschreiben. Die kurzen Zeitschritte bei der Berechnung von Konzentrationen und Photodissoziation machen das Modell geeignet für Untersuchungen der Stratosphäre in hohen Breiten. Heterogene Prozesse in der Stratosphärenchemie werden in den vorliegenden Berechnungen nicht erfaßt. Grobe Ansätze zur Abschätzung der Bedeutung dieser wichtigen Prozesse in hohen Breiten sind aber in der neuesten Modellversion (53) entwickelt worden.

In der Troposphäre wird das Auswaschen stark wasserlöslicher Gase durch Niederschläge berücksichtigt. Die relative Luftfeuchtigkeit in der Troposphäre wird konstant gehalten. Ihre Höhen- und Breitenabhängigkeit stützt sich auf Beobachtungen. Von der Erdoberfläche aufsteigende Flüsse der Gase  $\text{NO}_x$ ,  $\text{CO}$ ,  $\text{CH}_4$ ,  $\text{N}_2\text{O}$ , Methylchloroform ( $\text{CH}_3\text{CCl}_3$ ), Tetrachlorkohlenstoff ( $\text{CCl}_4$ ), FCKW, der teilhalogenierten FCKW und der Halone werden als Eingabegrößen am unteren Rand der Atmosphäre verwendet. Für Methylchlorid ( $\text{CH}_3\text{Cl}$ ) und Methylbromid ( $\text{CH}_3\text{Br}$ ) werden konstante Mischungsverhältnisse von 600 pptv beziehungsweise 10 pptv angenommen.

### 1.3 Leistungsfähigkeit der Modelle sowie Genauigkeit der Vorhersagen

Typisch für alle chemischen Modelle ist, daß die Konzentrationen von etwa 30 bis 50 Luftbestandteilen unterschiedlichster Lebensdauer aus weit über hundert chemischen Reaktionsgleichungen mit häufig nichtlinearen Wechselwirkungen berechnet werden. In diesen Reaktionen ist im allgemeinen das Auswaschen stark löslicher Gase in Wolken enthalten, jedoch nicht die Chemie in den Wolkentropfen selbst, die bei Stickoxiden und auch troposphärischem Ozon nach neuesten Untersuchungen eine wichtige Rolle spielen dürfte (54). Die Geschwindigkeitskonstanten all dieser Reaktionen sind experimentell nur im Rahmen von Fehlerschranken bekannt, die im Einzelfall 50 Prozent übersteigen können. Zur Abschätzung der Fortpflanzung dieser Fehler auf die berechnete Ozonzerstörung für den ungünstigsten Fall vgl. (55, 56). Bei der Berechnung von Photolyseraten wirken sich die Eigenschaften des zugrundeliegenden solaren Strahlungstransportmodells aus, insbesondere die spektrale Auflösung, Behandlung von Streuprozessen und Bodenreflexion, Temperaturabhängigkeit von Absorptionsquerschnitten und Quantenausbeuten sowie Tagesmittelung (zum Beispiel 57). Fehler dieser Art

lassen sich allerdings durch Erhöhung des numerischen Aufwands gering halten.

Mit Ausnahme einiger grober Versuche, unter anderem mit dem Osloer Modell (58, 59), sind die sogenannten heterogenen Reaktionen an Eis- und Aerosolteilchen in der unteren Stratosphäre, durch die chemisch aktive Chlorverbindungen freigesetzt werden und die unter anderem bei der Ausbildung des Ozonlochs eine wichtige Rolle spielen, nicht berücksichtigt. Aus diesem Grunde wird die Ozonzerstörung in der unteren Stratosphäre durch Chlorverbindungen in den Modellen deutlich unterschätzt. Das wiederum wirkt sich auf die errechneten Gesamtozonänderungen aus. Für den Zeitraum von 1978 bis 1988 berechnet das Mainzer Modell zum Beispiel eine Ozonabnahme von einem Prozent, während etwa drei Prozent im Jahresmittel beobachtet wurden (60). Im Höhenbereich zwischen 30 und 40 km dagegen, wo Reaktionen auf Partikeln unbedeutend sind, stimmt die berechnete mittlere Ozonänderung gut mit Beobachtungen (zum Beispiel 61) überein.

Ein weiterer wesentlicher Grund für Modellunsicherheiten liegt in der Parametrisierung des Transports. Beim eindimensionalen Modell zum Beispiel ist die gesamte Meteorologie nur sehr grob in sogenannten Diffusionskoeffizienten enthalten. Deren Profil, besonders im Bereich der Tropopause, beeinflusst die Lebensdauern und Konzentrationen langlebiger Spurenstoffe wie zum Beispiel der FCKW.

Bedeckungsgrad, Wolkenhöhe und optische Parameter der Wolken werden konstant gehalten, so daß mögliche klimatische Rückkopplungseffekte nicht erfaßt werden. Ebenso wird das Reflexionsvermögen der Erdoberfläche konstant gehalten (keine Eisalbedo-Rückkopplung).

Kritisch für die Darstellung klimatischer Effekte ist bei den chemischen Modellen die richtige Simulation der Wechselwirkung zwischen Methan ( $\text{CH}_4$ ), Kohlenmonoxid ( $\text{CO}$ ) und Stickoxiden ( $\text{NO}_x$ ) sowie der mit dem Ozonabbau durch FCKW zusammenhängenden bis in bodennahe Schichten eindringenden UV-B-Strahlung. Eine eventuelle Zunahme von  $\text{CO}_2$ , wie zum Beispiel durch Biomasseverbrennung in den Tropen, bewirkt indirekt durch Verminderung der mittleren Konzentration der Hydroxyl(OH)-Radikale eine weltweite Zunahme des treibhausrelevanten  $\text{CH}_4$ , dessen Hauptsenke die Reaktion mit OH ist. Die Ozonzerstörung durch FCKW verlangsamt andererseits bei gleichen Emissionen den Methananstieg, da durch die erhöhte UV-Strahlung mehr OH-Radikale gebildet werden. Mit globalen eindimensionalen Modellen läßt sich diese Wechselwirkung nicht zufriedenstellend erfassen, da diese vor allem die Konzentrationen der Stickoxide bei gegebenen Emissionen und somit den mittleren OH-Gehalt in der unteren Troposphäre überschätzen. Sie errechnen also eine zu starke Senke für Methan. Wie bereits erwähnt, erreicht man eine deutliche Verbesserung, wenn man für Nord- und Südhemisphäre getrennt rechnet (1½-D-). Noch besser ist es aber, zu 2-D- und 3-D-Modellen überzugehen.

## 2. Szenarien der Emissionen ozonrelevanter Substanzen

Es werden insgesamt sechs Szenarien unter Berücksichtigung des Montrealer Protokolls und der auf der 2. Vertragsstaatenkonferenz in London vereinbarten Verschärfung definiert. Vier Szenarien behandeln ausschließlich die Ozonabnahme, und zwei Szenarien, welche mit dem Endbuchstaben C gekennzeichnet sind, zeigen auch die Wechselwirkungen mit klimatisch wirksamen Spurengasen (vgl. auch Abschnitt C, 4. Kap. Nr.1.4). Zur leichteren Zuordnung enthält der Name des Szenarios, dem das Montrealer Protokoll zugrunde liegt, ein M als ersten Buchstaben, während bei den Szenarien, die auf den Ergebnissen der 2. Vertragsstaatenkonferenz in London basieren, der erste Buchstabe L ist. Die Szenarien, in die die Forderungen der Enquete-Kommission zur Reduktion ozonzerstörender Substanzen eingehen, sind mit EK gekennzeichnet.

### 2.1 Entwicklung der FCKW- und Halonemissionen

Nach dem Montrealer Protokoll (62) soll die Produktion vollhalogenierter FCKW (FCKW 11, 12, 113, 114, 115) und der Halone (1211, 1301 und 2402) ab 1990 auf den Stand von 1986 zurückgefahren werden, der in Tabelle 2 zusammengestellt ist. Ab 1994 soll die Produktion von FCKW auf 80 Prozent des Wertes von 1986 reduziert und schließlich 1999 auf die Hälfte der Menge von 1986 zurückgenommen werden. Bei den Halonen sind keine weiteren Reduktionen vorgegeben (vgl. 5. Kapitel, Nr. 1.1.2). Bei der Modellierung des Montrealer Protokolls wurde deshalb angenommen, daß die FCKW-Produktion ab 1999 und die Halon-Produktion ab 1990 konstant bleibt. Zwischen 1986 und 1990 wurde ein Wachstum um sechs Prozent pro Jahr zugelassen. Eine nach dem Protokoll mögliche Verschiebung zwischen den einzelnen FCKW unter Berücksichtigung der jeweiligen Ozonzerstörungspotentiale wurde ausgeschlossen. Eine ausführliche Diskussion der Konsequenzen von verschiedenen Ausnahmeregelungen, die besonders für Entwicklungsländer vorgesehen sind, sowie einer nicht weltweiten Ratifizierung ist in (63, 64) zu finden.

Da abzusehen ist, daß von den meisten Ausnahmeregelungen kein Gebrauch gemacht wird, und da mit einer weltweiten Ratifizierung bei gleichzeitiger Verschärfung der Vereinbarungen zu rechnen ist, wurde für diese Studie als schlimmster Fall angenommen, daß sich die FCKW- und Halonproduktion nach der Fassung des Montrealer Protokolls von 1987 ohne Ausnahmeregelungen entwickelt (Szenario MD).

Auf der 2. Vertragsstaatenkonferenz zum Montrealer Protokoll in London wurde im Juni 1990 eine internationale Vereinbarung getroffen, die eine Reduzierung der FCKW-Produktion um 20 Prozent im Jahr 1993, eine Halbierung der Produktion von FCKW und Halonen im Jahr 1995 und deren Einstellung im Jahre 2000 vorsieht. Zwischen 1997 und 2000 soll die FCKW-Produktion maximal 15 Prozent des Wertes von 1986 betragen (vgl. 5. Kapitel, Nr. 1.1.3). Diese Möglichkeit wird in den Szenarien LD, LW und LWC untersucht.

Tabelle 2

**Abgeschätzte Produktion der von den Reduktionsmaßnahmen betroffenen Halogenkohlenwasserstoffe 1986, gegeben in Kilotonnen (kt). Die Summe der FCKW beträgt 1 209 kt pro Jahr anstatt der bei dem Montrealer Protokoll angenommenen 1 140 kt pro Jahr. Diese Differenz ist wegen der ungenau bekannten FCKW-Produktion in den Ländern Osteuropas und der Sowjetunion sowie der Produktion von FCKW 113, 114 und 115 zu rechtfertigen.**

	Welt	Bundesrepublik Deutschland	Europäische Gemeinschaften
FCKW 11 .....	416,00	51,60	203,94
FCKW 12 .....	544,00	42,40	167,48
FCKW 113 .....	206,00	14,20	56,06
FCKW 114 .....	23,00	2,20	8,78
FCKW 115 .....	20,00	1,60	6,31
Halon 1301 .....	10,00	1,10	4,80
Halon 1211 .....	14,00	3,30	7,20
Halon 2402 .....	1,00		
H-FCKW 22 .....	100,00	6,00	25,00
CCl <sub>4</sub> *) .....	100,00	0,00	0,00
CH <sub>3</sub> CCl <sub>3</sub> .....	609,00	38,50	158,00

\*) Nicht zur FCKW-Produktion verwendeter Anteil

Bei diesen Szenarien wird angenommen, daß die vorgesehenen Ausnahmeregelungen zur Deckung des Bedarfs in Entwicklungsländern ausgenutzt werden, daß also die Produktion in den ersten Stufen um 10 Prozent und in der jeweils letzten Stufe um 15 Prozent weniger reduziert wird. Die endgültige Produktionseinstellung erfolgt dann erst im Jahre 2010.

Bei den Enquete-Kommissions-Szenarien EK und EKC sollen die Ausnahmeregelungen nicht zum Tragen kommen. Hier wird zusätzlich angenommen, daß die Forderungen der Kommission sowohl national als auch in den Europäischen Gemeinschaften umgesetzt werden. Das bedeutet eine Reduktion der FCKW- und Halonproduktion in der Bundesrepublik Deutschland um 50 Prozent bis Ende 1990, 75 Prozent bis Ende 1992 und 100 Prozent bis Ende 1995 und in der EG um 50 Prozent bis Ende 1992, 75 Prozent bis Ende 1995 mit Produktionseinstellung Ende 1997.

Die Umrechnung von Produktion auf Emission erfolgt, wie in Brühl und Hennig (65) beziehungsweise Brühl und Crutzen (66) dargestellt. Für FCKW 11 in Hartschäumen wurde angenommen, daß 10 Prozent bei der Herstellung der Schaumstoffe entweicht und der Rest gleichmäßig während der folgenden zwanzig Jahre an die Atmosphäre abgegeben wird. Von den Halonen, die hauptsächlich in Feuerlöschsystemen gespeichert sind, soll pro Jahr ein Siebtel der vorhandenen Menge von Halon 1211 und 5/18 der vorhandenen Menge von Halon 1301 freigesetzt werden (67). Bei einer deutlichen Produktionsverringerung bedeutet dies eine deutliche Verschiebung des Rückgangs der Emissionen.

## 2.2 Einfluß teilhalogenerter FCKW, des Methylchloroforms (CH<sub>3</sub>CCl<sub>3</sub>) und des Tetrachlorkohlenstoffs (CCl<sub>4</sub>)

Da teilhalogenierte FCKW wie H-FCKW 22 und Methylchloroform im ursprünglichen Montrealer Protokoll nicht erfaßt sind, wurde im Szenario MD angenommen, daß deren Emissionswachstumsrate ab 1986 bei etwa drei Prozent pro Jahr bis zum Jahre 2000 liegt und die Produktion von Methylchloroform (CH<sub>3</sub>CCl<sub>3</sub>) dann zu einem Nullwachstum übergeht. Bei H-FCKW 22 soll das Wachstum bis 2015 anhalten, da die USA in Gesetzesentwürfen eine Beschränkung für H-FCKW 22 erst im Jahre 2015 vorsehen. Des weiteren wird in Szenario MD (schlimmster Fall) angenommen, daß in den Industriestaaten das als Kühlmittel eingesetzte FCKW 12 durch H-FCKW 22 ersetzt, sowie in den Entwicklungsländern zugelassen wird, daß der Prokopfverbrauch an Kühlmitteln innerhalb von 40 Jahren auf das Niveau der Industrieländer (zur Zeit etwa 0,3 kg FCKW 12 pro Kopf, entsprechend 0,22 kg H-FCKW 22 bei gleicher Kälteleistung (68)) ansteigt. In Szenario MD wurde angenommen, daß die Bevölkerung der Entwicklungsländer von heute etwa vier Milliarden Menschen bis zum Jahre 2040 mit der gegenwärtigen Rate von 1,6 Prozent pro Jahr zunimmt und dann konstant bleibt. Bei diesem Szenario erreicht man bis zum Jahre 2050 nahezu die hohen Emissionsraten für H-FCKW 22 von 2,9 Millionen Tonnen pro Jahr, die vom Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) vorgeschlagen wurden. In dem Szenario LD, das die Ergebnisse der 2. Vertragsstaatenkonferenz in London berücksichtigt, wird eine analoge Expansion des H-FCKW 22-Einsatzes angenommen.

In Szenario LW soll der Einsatz des H-FCKW 22 in den Entwicklungsländern nicht so stark zunehmen. In diesem Szenario soll jedoch in den Industrieländern 50 Prozent der von den Reduktionen betroffenen FCKW-Produktion durch H-FCKW 22 ersetzt werden. Gemäß den Gesetzesentwürfen der amerikanischen Regierung soll ab dem Jahre 2015 die H-FCKW 22-Produktion zwanzig Jahre konstant bleiben und dann bis zum Jahre 2040 gleichmäßig auf Null reduziert werden. In den EK-Szenarien soll die H-FCKW 22-Produktion zwischen 2001 und 2005 vollständig eingestellt werden.

Für Methylchloroform gilt in den Szenarien LD, LW, EK und EKC folgender Reduktionsplan:

Einfrieren der Produktion auf den Stand von 1989 in 1993, Reduzierung um 30 Prozent in 1995, Produktionshalbierung in 2000, Produktionseinstellung in 2005 (vgl. 5. Kap. Nr. 1.1.3). In den Szenarien LD und LW werden hier wieder die Ausnahmeregelungen für die Entwicklungsländer zugelassen; in den EK-Szenarien gelten für den Produktionsanteil der Bundesrepublik Deutschland und der EG dieselben Reduktionsstufen wie für die FCKW.

Es wird angenommen, daß 1986 135 kt Tetrachlorkohlenstoff ( $\text{CCl}_4$ ) emittiert wurden, davon 35 kt bei der Produktion von FCKW 11 und FCKW 12. Dieser Anteil folgt den Reduktionsquoten der FCKW-Produktion. Der Rest der Emissionen, unter anderem durch den Einsatz dieses Stoffes als Lösungsmittel, soll nach den Vereinbarungen der 2. Vertragsstaatenkonferenz zum Montrealer Protokoll nach folgendem Zeitplan reduziert werden: Halbierung 1993, Reduktion auf 15 Prozent 1995, Einstellung im Jahre 2000. In den Szenarios LD und LW sollen hier wieder die Ausnahmeregelungen ausgenutzt werden. In Szenario MD entwickelt sich die  $\text{CCl}_4$ -Restemission analog zu der des  $\text{CH}_3\text{CCl}_3$ .

Für alle voll- und teilhalogenierten FCKW wird angenommen, daß 95 Prozent auf der Nordhalbkugel emittiert werden (vgl. 2. Kap., Nr. 1.2). Die Zunahme der H-FCKW 22-Emission in den Entwicklungsländern wurde nach dem jetzigen Bevölkerungsanteil auf die Hemisphären verteilt.

### 2.3 Andere ozon- und klimarelevante Gase

Eine Zunahme der Methan ( $\text{CH}_4$ )- und Kohlendioxid ( $\text{CO}_2$ )-Konzentrationen beeinflusst die Chemie in der Stratosphäre dahingehend, daß sich die Ozonzerstörung durch Chlor und Brom außerhalb des Ozonlochs verlangsamt. In allen Szenarien außer EKC und LWC wurde für das Volumemischungsverhältnis ( $\mu$ ) von  $\text{CH}_4$  nach 1985 angenommen (69):

$$\mu_{\text{CH}_4} = 1.71 + 0.017 \cdot (t - 1986) \text{ ppmv}$$

Für  $\text{CO}_2$  wird in den vier Ozonszenarien eine Zunahme der Konzentration um 0,4 Prozent pro Jahr angesetzt. Die gegenwärtige Zunahme liegt bei 0,6 Prozent pro Jahr, der kleinere Wert ist aber eher repräsentativ für längere Zeiträume, falls man annimmt, daß die Emissionen weiter wachsen, allerdings nicht so stark wie in IPCC-Szenario A (vgl. Abschnitt C, 4.

Kap. Nr. 1.4), das bei Klima-Szenario LWC für  $\text{CO}_2$ ,  $\text{CH}_4$  und  $\text{N}_2\text{O}$  verwendet wird. In dem anderen mit "C" gekennzeichneten Szenario EKC wird eine Reduzierung der  $\text{CO}_2$ ,  $\text{CH}_4$  und  $\text{N}_2\text{O}$ -Emissionen nach dem IPCC-Szenario D angenommen. Hier bleiben die Emissionen bis 2025 etwa konstant und fallen dann bis 2050 auf etwa die Hälfte. Die Umrechnung auf Mischungsverhältnisse erfolgt bei  $\text{CO}_2$  auf der Basis von vorliegenden Emissions- und Konzentrationsdaten der näheren Vergangenheit.

Die Konzentration von  $\text{N}_2\text{O}$  soll mit den heutigen Zuwachsraten von 0,25 Prozent pro Jahr weiterwachsen (außer Szenario EKC und LWC). Für das Kohlenmonoxid ( $\text{CO}$ ) wurde ein konstanter Fluß von 555 Millionen Tonnen Kohlenstoff pro Jahr auf der Nordhalbkugel und 225 Millionen Tonnen Kohlenstoff pro Jahr auf der Südhalbkugel angenommen. Die Emission von Stickoxiden auf der Nordhalbkugel steigt (unter Vernachlässigung der  $\text{NO}_x$ -Produktion durch Blitze) von 28 Millionen Tonnen Stickstoff pro Jahr 1985 auf 54 Millionen Tonnen Stickstoff pro Jahr bis 2030 und bleibt dann konstant (70). Mit diesen Annahmen soll der Effekt der zunehmenden Industrialisierung und Motorisierung in Ländern wie China und Indien berücksichtigt werden, der Reduktionsmaßnahmen in den westlichen Industrienationen überkompensiert. Auf der Südhalbkugel werden konstante Emissionen von 5 Millionen Tonnen Stickstoff pro Jahr angenommen. Industrielle Quellen sollen fast ausschließlich auf der Nordhalbkugel liegen, natürliche Quellen zu 70 Prozent und die Biomasseverbrennung soll zu 55 Prozent auf der nördlichen Hemisphäre stattfinden.  $\text{CH}_4$ ,  $\text{CO}$  und  $\text{NO}_x$  beeinflussen die Bildung des Ozons in der Troposphäre sowie die Konzentration des Hydroxyl-(OH)-Radikals.

Typische berechnete Spurengaskonzentrationen aller Szenarien sind in Tabelle 3 zusammengestellt.

### 2.4 Prognostizierte Erhöhung des Chlor- und Bromgehalts in der Stratosphäre

Die mit dem eindimensionalen Mainzer Modell berechnete Entwicklung des Chlorgehalts in der Stratosphäre ist in Abbildung 3 (a) dargestellt. In allen außer den EK-Szenarien liegt der berechnete Chlorgehalt bis zum Jahre 2080 über 2,2 ppbv, dem Wert, bei dem das Ozonloch über der Antarktis offenkundig wurde. Bei vorgezogener Einstellung der FCKW-Produktion in der Bundesrepublik Deutschland und den Europäischen Gemeinschaften und frühzeitigem Verzicht auf H-FCKW 22 (Szenario EK) wird die Chlorkonzentration von 2,2 ppbv erst im Jahr 2067 unterschritten. Der gegenwärtige Wert von 3,2 ppbv wird bei einem Produktionsstopp aller FCKW einschließlich  $\text{CCl}_4$  und  $\text{CH}_3\text{CCl}_3$  vor dem Jahre 2005 und Auslaufen von H-FCKW 22 (Szenario EK) nach einem zwischenzeitlichen Anstieg auf 3,9 ppbv im Jahre 2032 wieder erreicht. Die Ausnahmeregelungen für die Entwicklungsländer sowie der massive H-FCKW 22-Einsatz bis 2040 in Szenario LW verzögern dies bis zum Jahre 2054.

Wichtig für den Schutz der Ozonschicht ist die Reduktion von Methylchloroform ( $\text{CH}_3\text{CCl}_3$ ): Der schnelle Abfall von CIX nach dem Jahr 2000 hängt damit zu-

Tabelle 3

**Übersicht der mit dem Mainzer Modell untersuchten Szenarien anhand charakteristischer berechneter Spurengaskonzentrationen in der Troposphäre auf der Nordhemisphäre (NH) und der Südhemisphäre (SH).**

Szenario	MD	LD	LW	EK	EKC	LWC	Einheit	
Typ	Ozon	Ozon	Ozon	Ozon	Klima	Klima		
Kurzbeschreibung								
FCKW-Reduktion	Montreal	London	London	Enquête	Enquête	London		
Halone	konstant	reduziert	reduziert	reduziert	reduziert	reduziert		
Ausnahmen, beide	nein	ja	ja	nein	nein	ja		
Ausstieg, Welt	keiner	2010	2010	2000	2000	2010		
H-FCKW 22	starkes	starkes						
	Wachstum**)	Wachstum**)	Washington			Washington		
Ausstieg	keiner	keiner	2040	2005	2005	2040		
CCl <sub>4</sub> , CH <sub>3</sub> CCl <sub>3</sub>	+ 3%/a *)	reduziert	reduziert	reduziert	reduziert	reduziert		
Ausstieg	keiner	2015	2015	2005	2005	2015		
CO <sub>2</sub> , CH <sub>4</sub> , N <sub>2</sub> O	heutige Wachstumsraten				IPCC-D	IPCC-BAU		
FCKW 12 in 2050	NH	1,017	0,463	0,463	0,410	0,410	0,463	ppbv
	SH	0,984	0,463	0,463	0,410	0,410	0,463	ppbv
in 2100	NH	1,263	0,340	0,342	0,303	0,302	0,342	ppbv
	SH	1,231	0,340	0,342	0,303	0,302	0,342	ppbv
Halon-1301, 2050	NH	18,72	4,35	4,36	3,49	3,48	4,36	pptv
	SH	17,78	4,35	4,36	3,49	3,48	4,36	pptv
in 2100	NH	25,15	2,68	2,70	2,16	2,15	2,70	pptv
	SH	24,38	2,68	2,70	2,16	2,15	2,70	pptv
H-FCKW 22 in 2050	NH	2,073	2,218	0,245	0,013	0,010	0,243	ppbv
	SH	1,919	2,051	0,254	0,013	0,011	0,253	ppbv
in 2100	NH	2,451	2,658	0,015	0,001	0,0	0,016	ppbv
	SH	2,308	2,503	0,016	0,001	0,0	0,017	ppbv
CH <sub>3</sub> CCl <sub>3</sub> , 2050	NH	267,4	0,2	0,2	0,1	0,0	0,2	pptv
	SH	200,9	0,2	0,2	0,1	0,1	0,2	pptv
CO <sub>2</sub> in 2050		447,9	447,9	447,9	447,9	408,1	514,3	ppmv
CO <sub>2</sub> in 2100		544,9	544,9	544,9	544,9	413,3	718,5	ppmv
CH <sub>4</sub> in 2050		2,798	2,798	2,798	2,798	1,779	2,963	ppmv
CH <sub>4</sub> in 2100		3,631	3,631	3,631	3,631	1,556	3,916	ppmv
N <sub>2</sub> O in 2050		362,5	362,5	362,5	362,5	352,9	380,1	ppbv
N <sub>2</sub> O in 2100		409,7	409,7	409,7	409,7	372,9	433,5	ppbv

\*) konstant ab 2000

\*\*) als Kühlmittel in 3. Welt, ausgehend von 4 Milliarden Menschen, siehe Text

sammen, daß etwa 0,6 ppbv Chlor von dieser Substanz mit einer Halbwertszeit von etwa sieben Jahren stammen. In Szenario MD, dem extremen Montreal-Szenario, steigt der Chlorgehalt bis zum Jahre 2100 auf etwa 9 ppbv, also mehr als das Vierfache des Werts von 1980 und das Fünzfache der natürlichen Hintergrundkonzentration. Die Ausweitung des H-FCKW 22-Einsatzes in den Entwicklungsländern sowie dessen Verwendung als Ersatzstoff in den Industrieländern kann in diesem Szenario im Jahre 2100 1,6 ppbv Chlor in die Stratosphäre eintragen. Im Londoner Szenario LD verhindert der unbegrenzte H-FCKW 22-Einsatz einen Rückgang des Chlorgehalts in der Stratosphäre unter 4 ppbv bis zum Jahre 2100. Im Jahre 2100 liegt der Beitrag des H-FCKW 22 bei 2 ppbv.

Die mit dem eindimensionalen Mainzer Modell berechnete Entwicklung des Bromgehalts in der Stratosphäre bei konstanter Halonproduktion nach dem Montrealer Protokoll und bei einem Produktionsstopp spätestens im Jahre 2010 mit und ohne Ausnahmen für Entwicklungsländer ist in Abbildung 3 (b) dargestellt. Mit den Vorgaben des Montrealer Protokolls erhöht sich der Bromgehalt in der Stratosphäre auf mehr als das Dreifache der natürlichen Hintergrundkonzentration von Methylbromid (CH<sub>3</sub>Br), die mit etwa 15 pptv angesetzt wurde.

In den Szenarien LD und LW, in denen die Ergebnisse der 2. Vertragsstaatenkonferenz zum Montrealer Protokoll in London berücksichtigt werden, wird im Jahre 2001 eine Bromkonzentration von 26 pptv erreicht. Im

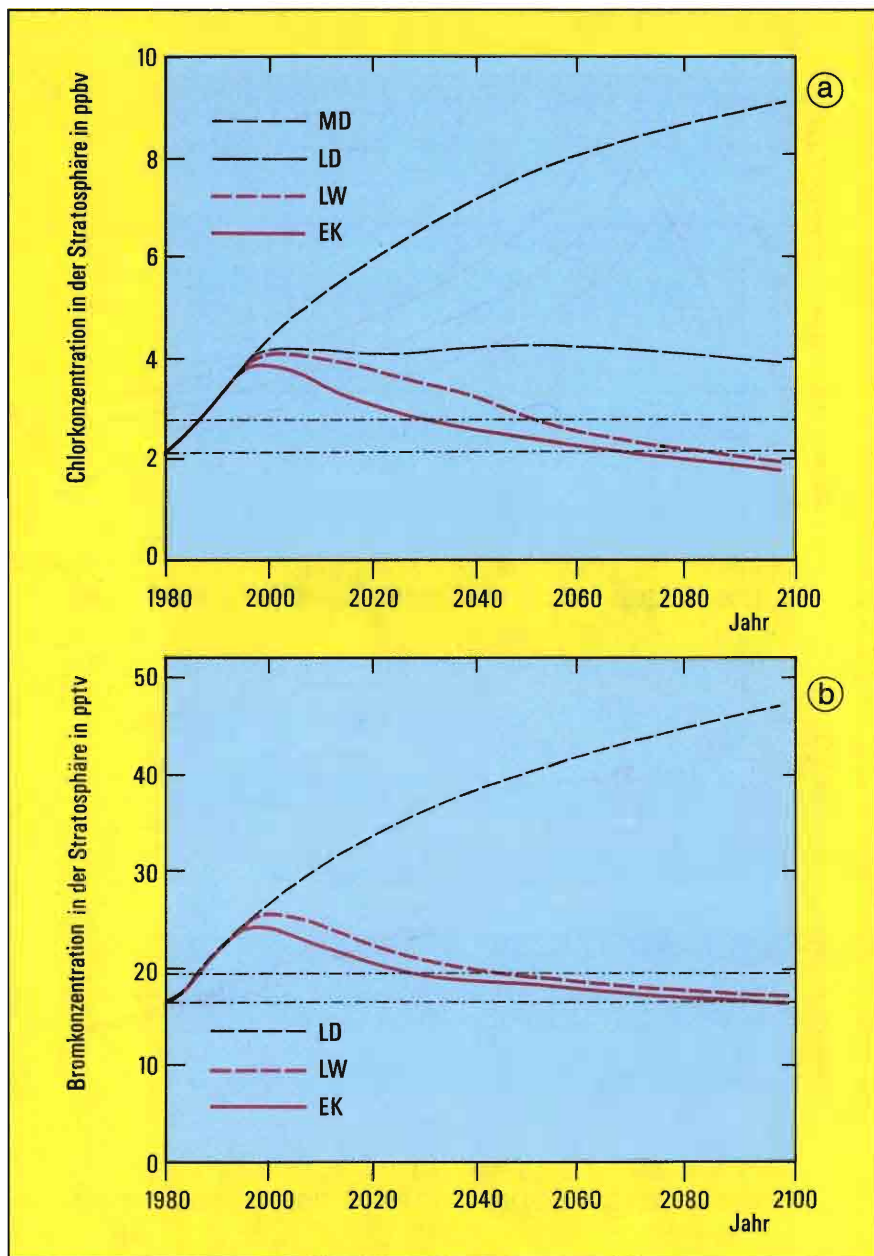


Abb. 3: Zeitliche Entwicklung der berechneten Chlor- (Teil a) und Bromvolumenmischungsverhältnisse (Teil b) in der Stratosphäre für die mit dem Mainzer 1½D-Modell untersuchten Szenarien. (MD: Montreal mit H-FCKW 22-Wachstum; LD: London mit H-FCKW 22-Wachstum; LW: London mit Washingtoner H-FCKW 22-Begrenzung; EK: Vorgezogene Reduktion in Bundesrepublik Deutschland und EG, H-FCKW 22-Ausstieg im Jahre 2005) In Teil b ist der Bromgehalt für alle Szenarien der Gruppe L etwa identisch. Hier entsprechen die mit C gekennzeichneten Klima-Szenarien den entsprechenden Ozonszenarien (siehe Text).

Jahre 2100 wäre der anthropogene Beitrag auf 3 pptv reduziert. Im Szenario EK liegt der maximale Bromgehalt nur 9 pptv über der natürlichen Hintergrundkonzentration. Eine weitere Verschärfung des EK-Szenarios in dem Sinne, daß der weltweite Stopp der Produktion der vollhalogenierten Kohlenwasserstoffe Ende 1997 statt Ende 1999 erfolgt (Brasilia-Szenario), reduziert den Chlor- und Bromgehalt geringfügig.

Die Ergebnisse der Szenarien der Gruppe L/EK stimmen im wesentlichen mit der einfachen Abschätzung

des Brom- und Chlorgehalts in der Stratosphäre nach einem Stopp der Emissionen aus den Lebensdauern der einzelnen Halogenkohlenwasserstoffe nach der Arbeit von Prather und Watson (71) überein. Wie sich eine zeitliche Verschiebung der Produktionseinstellung aller FCKW einschließlich  $\text{CH}_3\text{CCl}_3$ ,  $\text{CCl}_4$  und H-FCKW 22 auswirkt, zeigt Abbildung 4 (a). In der obigen Studie wurde angenommen, daß die Produktionseinstellung abrupt, das heißt in einer Stufe, durchgeführt wird. Eine Verschiebung des Stopps um fünf Jahre bedeutet, daß es etwa siebzehn Jahre länger

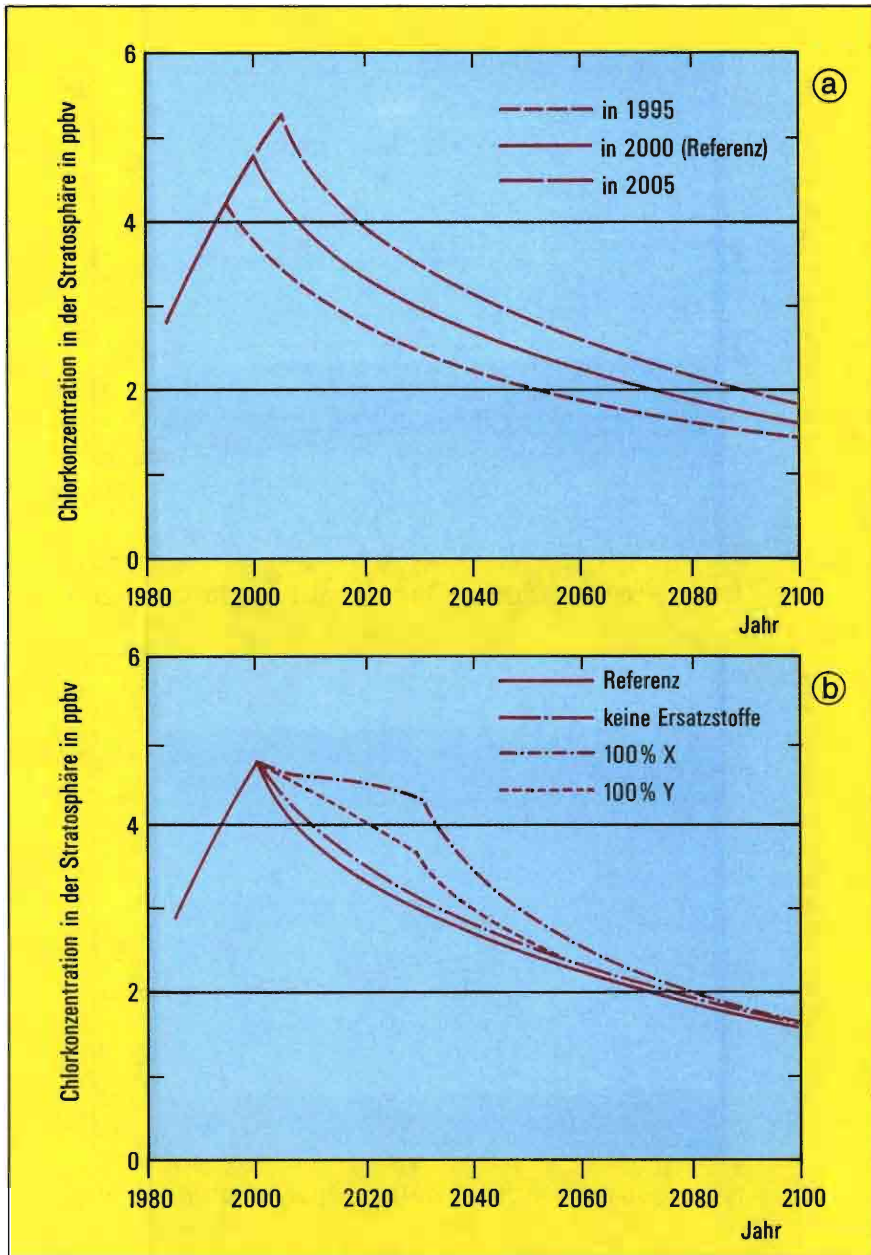


Abb. 4: Von Prather und Watson (72) berechnete Entwicklung der CIX-Konzentration in der Stratosphäre für:

Teil a: unterschiedliche Zeitpunkte der Einstellung der gesamten FCKW-Produktion (Jahre 1995, 2000, 2005);

Teil b: Einsatz von Ersatzstoffen mit Lebensdauern von 15 Jahren (Stoff X) oder 6 Jahren (Stoff Y) für die gesamte vermiedene FCKW-Menge über 30 Jahre.

Bei b werden außer in dem durchgezogen dargestellten Standardfall Reduktion und Ersatz von zehn Prozent der Emissionen im Jahre 2000 um 15 Jahre verzögert.

dauert, bis die CIX-Menge von 1980 wieder erreicht wird. In Abbildung 4 (b) ist dargestellt, wie sich Ersatzstoffe mit einer charakteristischen Lebensdauer von fünfzehn Jahren (Substanz X, entspricht etwa H-FCKW 22) und sechs Jahren (Substanz Y, zum Beispiel H-FCKW 124), jeweils mit einem Chloratom, auswirken. Es wurde jeweils angenommen, daß die nicht mehr produzierte FCKW-Menge für dreißig Jahre zu 100 Prozent durch diesen Ersatzstoff ersetzt und dann die Ersatzstoffproduktion ebenfalls einge-

stellt wird. Außerdem ist in der Abbildung dargestellt, welche Auswirkungen eintreten, wenn auf zehn Prozent der FCKW-Produktion erst fünfzehn Jahre später verzichtet wird. Der zeitweilige Einsatz von Ersatzstoffen trägt nach dieser Studie im Jahr 2080 nur noch vernachlässigbar wenig zum Chlorgehalt in der Stratosphäre bei. Allerdings bleibt die Chlorkonzentration bei der Verwendung chlorhaltiger Ersatzstoffe dreißig Jahre länger auf dem hohen Niveau, als bei einem Verzicht auf diese Substanzen.



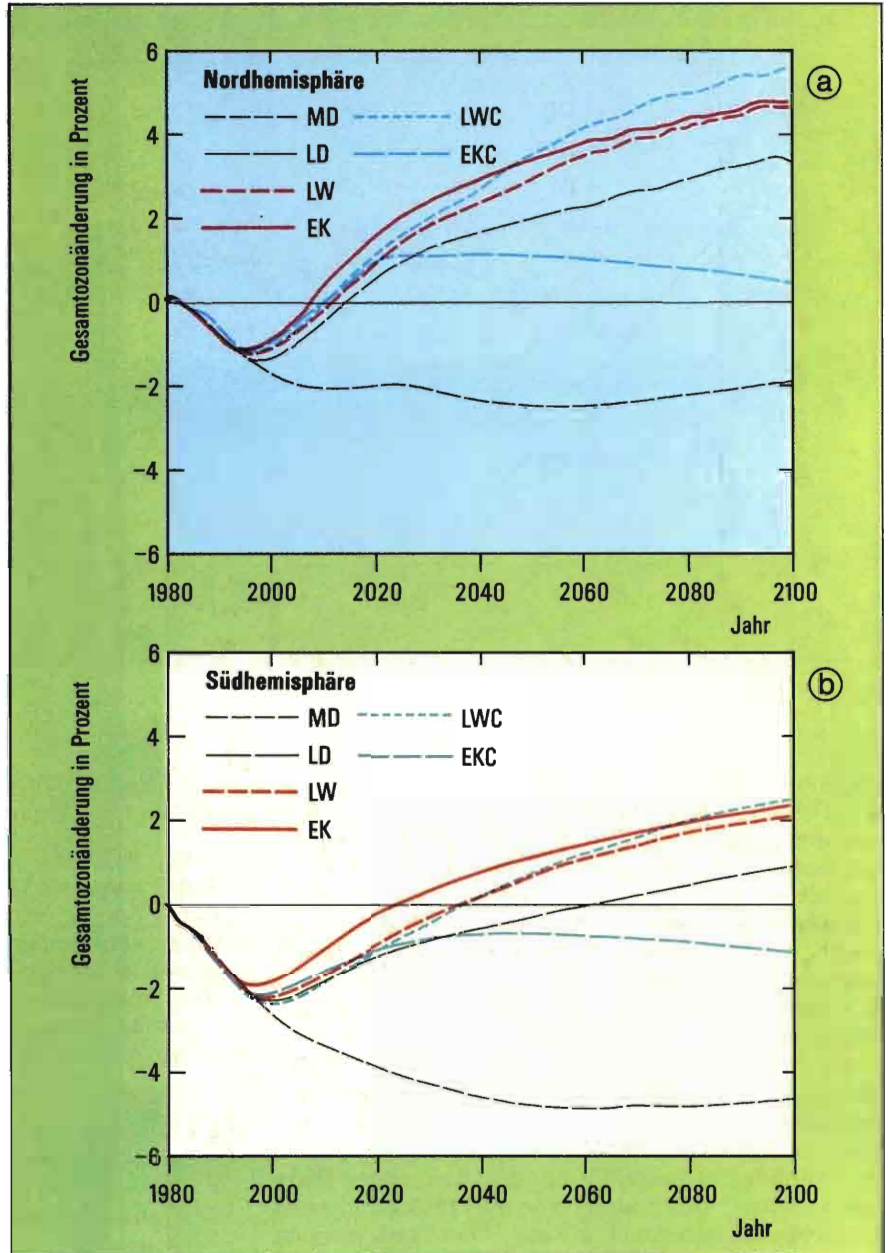


Abb. 5: Mit dem Mainzer Modell berechnete Änderungen des Gesamtozongehalts auf der Nordhalbkugel (Teil a) und der Südhalbkugel (Teil b) für die Szenarien nach Abbildung 3 und Tabelle 3.

Teil c enthält die für die Südhalbkugel berechnete Änderung des Ozons in der Stratosphäre, die etwa auch für die Nordhemisphäre gilt. Bei Szenario EKC sind CO<sub>2</sub>- und Methananstieg begrenzt bei geringerer N<sub>2</sub>O-Zunahme als in Szenario EK. In Szenario LWC steigen CO<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub> und N<sub>2</sub>O schneller als bei Szenario LW; (siehe Text).

### 3. Prognostizierte Veränderungen

#### 3.1 Abnahme des Gesamtozongehalts

Die mit dem 1½D-Modell für die Szenarien aus Nr. 3.2 berechneten Änderungen der Konzentration des Gesamtozons auf der Nord- und Südhalbkugel gegenüber 1980 sind in Abbildung 5 (a, b) dargestellt. Deutlich ist zu sehen, daß der Anstieg der Ozonkonzentration in der Troposphäre (vgl. Abb. 6) dafür sorgt, daß auf der Nordhalbkugel der Ozonabbau in der Stra-

tosphäre teilweise kompensiert wird. Auf der Nordhalbkugel erreichen die für den schlimmsten Fall prognostizierten Ozonänderungen gerade zwei Prozent, während im entsprechenden Szenario auf der Südhalbkugel, das heißt da, wo weniger Stickoxide in der Troposphäre sind und deshalb weniger Ozon gebildet wird, fünf Prozent berechnet werden.

Da erhöhte Ozonkonzentrationen in der Troposphäre wegen der Toxizität und Treibhauswirksamkeit nachteilig sind, sind Maßnahmen, die diese Ozonbildung verhindern – das heißt Reduzierung der anthro-

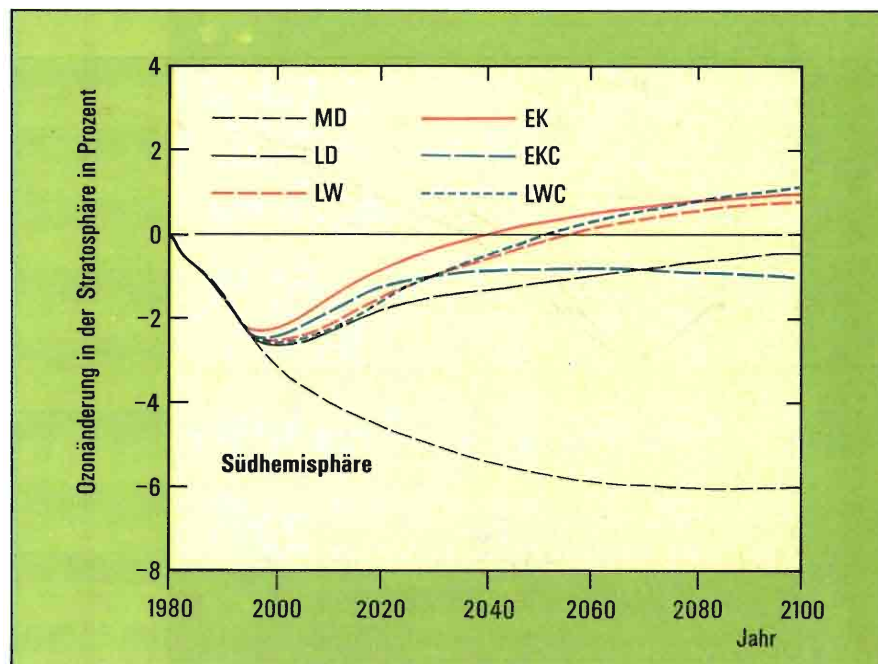


Abb. 5 (c): vgl. Seite 329

pogenen  $\text{NO}_x$ -Emission – notwendig und zu erwarten. Das Klimaszenario EKC zeigt, daß im Falle einer Verringerung der Methankonzentration die Kompensation durch die Troposphäre praktisch ausfällt. Es ist deshalb wichtig, Änderungen des Ozongehalts in der Stratosphäre separat von der Entwicklung in der Troposphäre zu betrachten, wie in Abbildung 5 (c) dargestellt. Im Modell wurde dazu das Ozon oberhalb elf Kilometer Höhe betrachtet, wo die Unterschiede zwischen den Modellhemisphären gering sind. Man sieht, daß in Szenario LD der unbegrenzte H-FCKW 22-Einsatz die Regenerierung des Ozons in der Stratosphäre verhindert, und daß sich gegenüber dem Montrealer Szenario die Situation drastisch verbessert hat. Mit den Szenarien EK und LW wird gegen Ende des nächsten Jahrhunderts eine leichte Zunahme des Gesamt Ozons berechnet, die allerdings stark von den Annahmen über Methan abhängt. Es ist deutlich zu sehen, daß im Falle einer  $\text{CO}_2$ - und  $\text{CH}_4$ -Begrenzung und eines langsamen  $\text{N}_2\text{O}$ -Anstiegs (Szenario EKC) auch bei drastischen Maßnahmen zu Reduktion chlor- und bromhaltiger Stoffe das Ozon in der Stratosphäre den Stand von 1980 nicht mehr erreicht. In diesem Falle bestimmt  $\text{N}_2\text{O}$  die Ozonkonzentration in der Stratosphäre, wie eine hier nicht dargestellte Rechnung mit dem in den Ozonszenarien benutzten  $\text{N}_2\text{O}$ -Zuwachs zeigt, wo im Jahre 2100 der Ozonabbau in der Stratosphäre bei zwei Prozent läge, statt bei einem Prozent wie in Szenario EKC. Bei einem schnellen  $\text{CO}_2$ -Anstieg (LWC) erholt sich der Ozongehalt in der Stratosphäre wegen der Abkühlung der oberen Stratosphäre einige Jahre früher als in Szenario LW. Das Ergebnis ist allerdings ein anderes, wenn heterogene Reaktionen in der unteren Stratosphäre mitberücksichtigt werden, da dort die Abkühlung durch  $\text{CO}_2$  die Ozonerstörung beschleunigt. Des Weiteren bewirkt dann die Zunahme von Lachgas und Methan, das zu höheren Wasserdampfkonzentrationen führt, eine Zunahme der Häufigkeit von polaren stratosphä-

rischen Wolken. Dies wiederum erhöht die Effektivität der Chlorfreisetzung.

Wie bereits für die Entwicklung im vergangenen Jahrzehnt erwähnt, ist nachdrücklich darauf hinzuweisen, daß bei der Berechnung der Ozonabnahme nur die reine Gasphasenchemie betrachtet wird. Berücksichtigt man hingegen auch heterogene Reaktionen, die bei der Entstehung des Ozonlochs eine entscheidende Bedeutung haben (vgl. 1. Kap.), kann die künftige Ozonzerstörung dreimal höher sein.

### 3.2 Änderung von Ozonverteilung und Temperaturverteilung

Die Vertikalverteilung der berechneten Ozon- und Temperaturänderungen ist in Abbildung 6 für die extremen Szenarien MD (a) und EK (b) am Beispiel der Nordhemisphäre dargestellt. Auf der Südhemisphäre wären die Ozonzunahmen in der Troposphäre weniger als halb so groß wie die hier dargestellten Werte von mehr als 40 Prozent im Jahre 2100 auf der Nordhemisphäre. Es ist außerdem zu bedenken, daß die Gesamtmenge des Ozons in der Troposphäre auf der Südhalbkugel nur etwa halb so groß ist wie auf der Nordhalbkugel. In der Stratosphäre treten praktisch keine Unterschiede auf. In Szenario MD ist die maximale Ozonabnahme bei 40 km Höhe etwa 35 Prozent im Jahre 2100 gegenüber 1980; die Änderung in der unteren Stratosphäre durch reine Gasphasenchemie liegt bei 3,5 Prozent. Hier spielt Brom eine wichtige Rolle. Bei Szenario EK ist die maximale Ozonänderung 16 Prozent im Jahre 2000 in 40 km Höhe, danach erfolgt eine Erholung und schließlich in der oberen Stratosphäre eine Ozonzunahme gegenüber 1980.

Oberhalb 44 km Höhe kühlt sich die Stratosphäre in Szenario MD um etwa 17 Grad bis zum Jahr 2100 ab. Ursache ist die geringere Absorption von Sonnen-

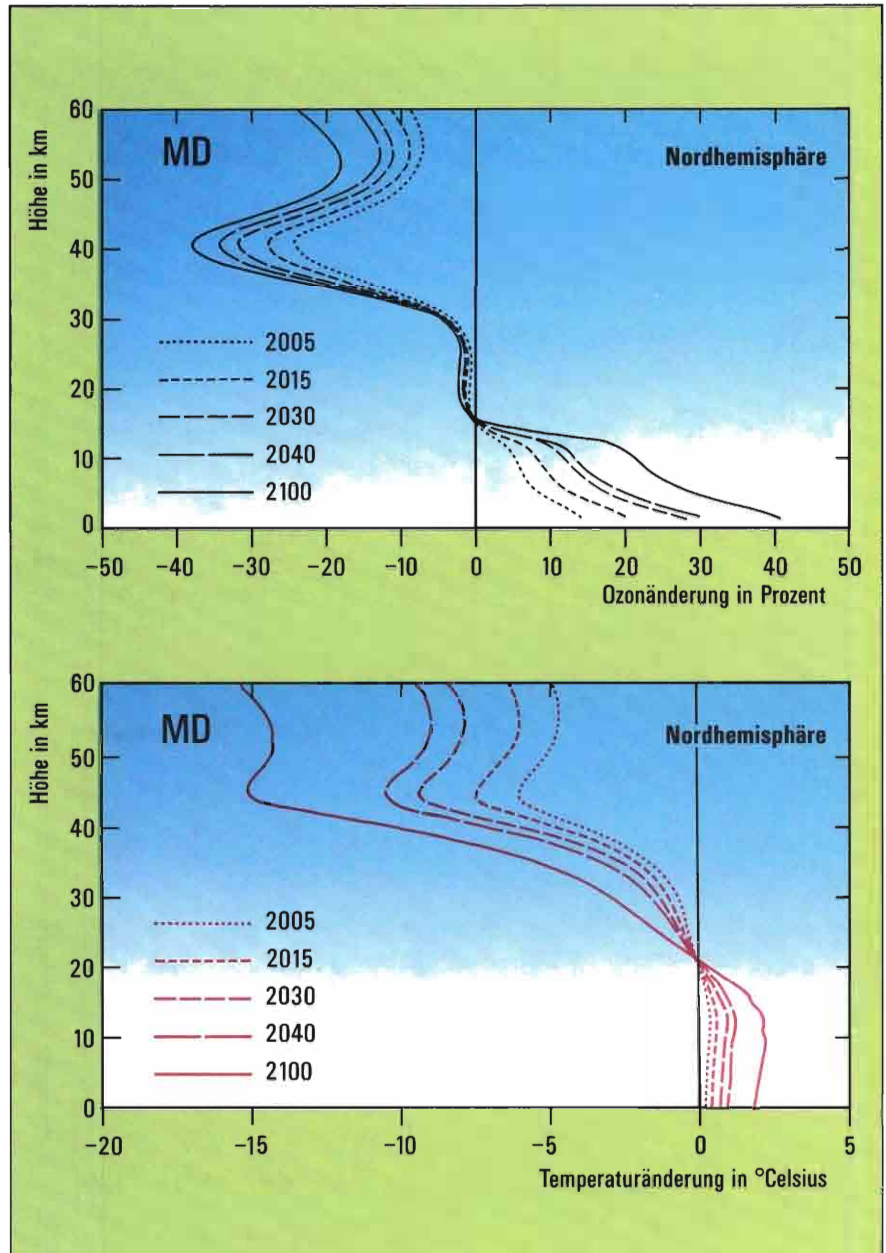


Abb. 6: Für die Nordhalbkugel mit dem Mainzer Modell berechnete Änderungen der Vertikalverteilung von Ozon und Temperatur gegenüber 1980 für die extremen Szenarien.  
Teil a: Montrealer-Szenario MD,  
Teil b: Verschärftes ‚Londoner‘ Szenario EK.

strahlung durch die Ozonzerstörung sowie die verstärkte Infrarotstrahlung des zusätzlichen Kohlendioxids. Diese starke Änderung kann Konsequenzen für die Transportprozesse in der Stratosphäre haben, was jedoch mit dem 1½-D-Modell nicht erfaßt werden kann. Unterhalb von etwa 20 km Höhe sieht man den Treibhauseffekt mit einem Temperaturanstieg von etwa 2 Grad in Bodennähe (Nordhalbkugel). H-FCKW 22 trägt im Jahre 2100 etwa 0,2 Grad zur Erwärmung bei. Die zeitliche Änderung der bodennahen Temperatur in allen Szenarien für beide Hemisphären ist in Abschnitt C, 4. Kapitel dargestellt. Bei dem optimistischen Szenario EK geht die Abkühlung der oberen Stratosphäre etwa nach 2005 wegen der Ozonzunahme auf etwa 5 Grad bis 2100 zurück. In der Me-

sosphäre sorgt die CO<sub>2</sub>-Zunahme zusammen mit der durch zusätzliches Methan ausgelösten Wasserdampfunahme für eine Temperaturemniedrigung um bis zu 11 Grad. Am Boden verringert sich die Erwärmung auf 1,6 Grad.

### 3.3 Erhöhung der UV-B-Strahlung in Erdbodennähe

Die berechnete Änderung der biologisch aktiven UV-B-Strahlung (Bestrahlung während eines Tages, gewichtet mit der DNS\*)-Empfindlichkeitskurve 73) in den vier Ozonszenarien und in Szenario EKC ist in

\*) Desoxyribonukleinsäure, die Erbsubstanz der lebenden Zellen

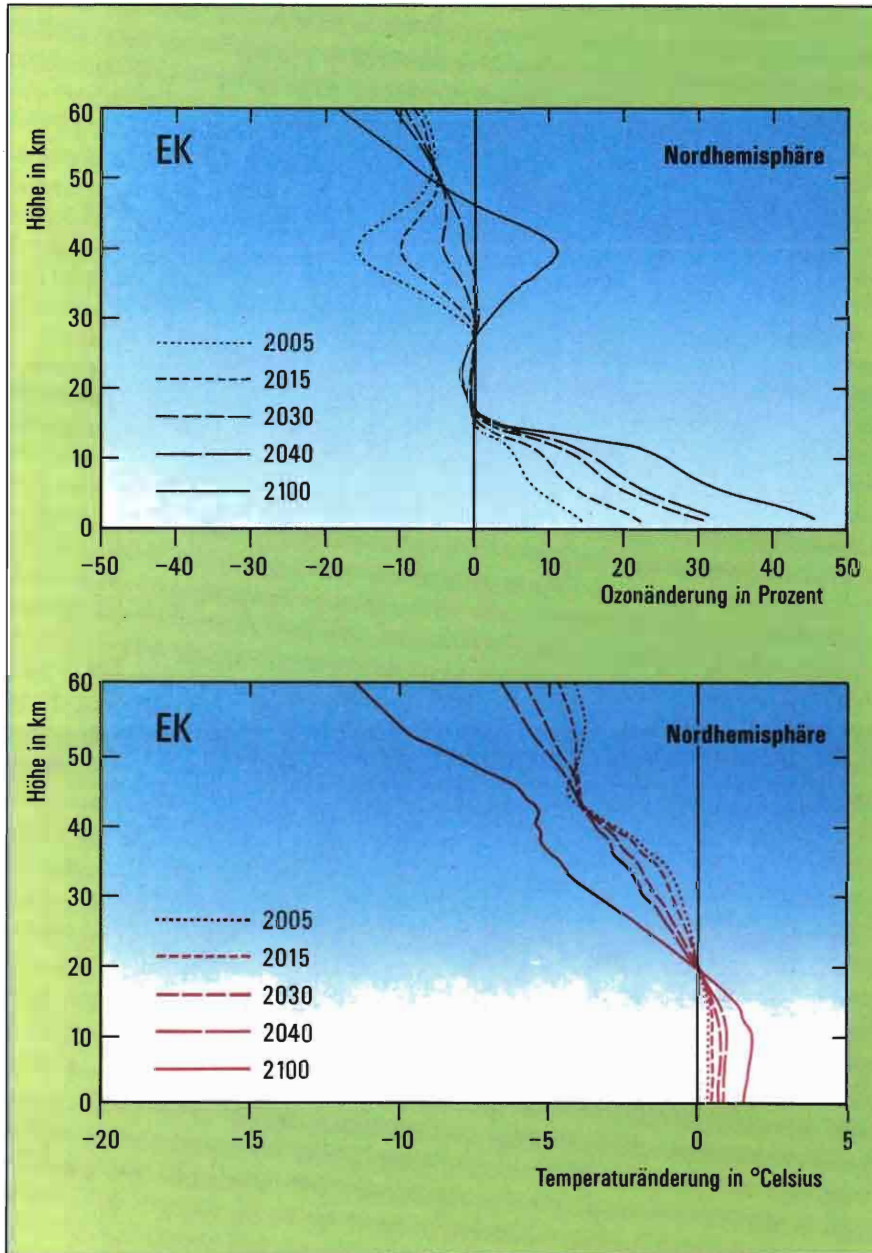


Abb. 6 (b): vgl. Seite 331

Abbildung 7 dargestellt. Die obere Kurvenschar gilt dabei für die Südhalbkugel, die untere für die Nordhalbkugel. Für die Südhalbkugel berechnet das Modell im schlimmsten Fall (Szenario MD) einen Anstieg der UV-B-Strahlung um 10 Prozent. Auf der Nordhalbkugel sorgt selbst im ungünstigsten Szenario der Anstieg des Ozons der Troposphäre durch die Methanzunahme (in Gegenwart von Stickoxiden) dafür, daß die UV-Zunahme gering bleibt und sogar mit der Zeit abnimmt. Bei den 'Londoner' Szenarien wird für das Jahr 2000 eine maximale UV-B-Zunahme um 2,5 bis 4,5 Prozent berechnet, die allerdings spätestens nach 2050 in beiden Hemisphären in eine Abnahme gegenüber 1980 übergeht.

Bei den Modellergebnissen muß berücksichtigt werden, daß das Modell heterogene Reaktionen, die bei

der Ausbildung des Ozonlochs eine entscheidende Rollen spielen, nicht einbezieht und dadurch der Ozonabbau in der unteren Stratosphäre und somit auch die Zunahme der UV-Strahlung unterschätzt werden. Aus 10 Prozent, wie in Szenario MD, können dadurch mehr als 25 Prozent Zunahme werden, wenn man, wie Beobachtungen nahelegen, annimmt, daß die tatsächliche Ozonzerstörung in der Stratosphäre dreimal so stark ist wie die mit Gasphasenchemie berechnete (vgl. oben). Falls für CO<sub>2</sub> und Methan drastische Beschränkungen eingeführt werden, wie unter Klimaaspekten wünschenswert, bleibt auch mit der Gasphasenchemie allein zumindest auf der Südhalbkugel selbst im günstigsten Szenario wegen der Ozonzerstörung durch N<sub>2</sub>O-Abbauprodukte eine erhöhte UV-B-Strahlung erhalten (Szenario EKC).

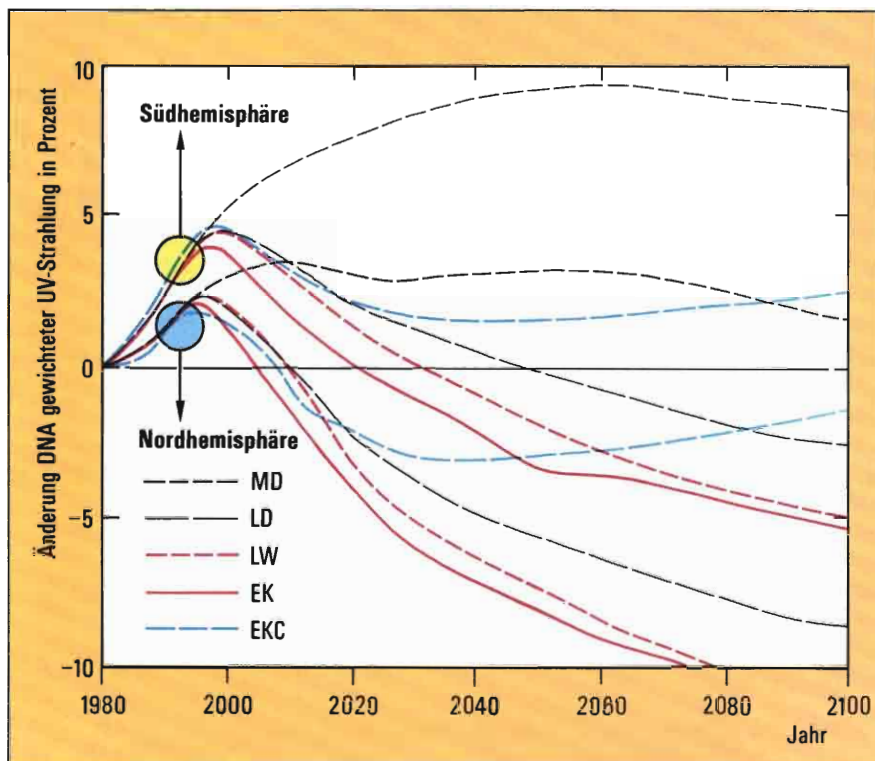


Abb. 7: Berechnete Änderungen der mit der biologischen Wirksamkeit gewichteten UV-Strahlung für die berechneten hemisphärisch gemittelten Ozonänderungen der Szenarien aus Abbildung 3 und Tabelle 3 (vgl. Abb. 5).  
Südhälfte oben, Nordhälfte unten

#### 4. Literaturverzeichnis

- (1) Crutzen, P. J. und U. Schmailzl: Chemical budgets of the stratosphere. *Planetary & Space Sci.*, 31, 1983, S. 1009-1032
- (2) Brühl, C. und P. J. Crutzen: Scenarios of possible changes in atmospheric temperatures and ozone concentrations due to man's activities, estimated with a one-dimensional coupled photochemical climate model. *Climate Dynamics*, 2, 1988, S. 173-203
- (3) Brasseur, G. und A. DeRudder: The potential impact on atmospheric ozone and temperature of increasing trace gas concentrations. *J. Geophys. Res.*, 92, 1987, S. 10903-10920
- (4) Callis, L. B.; M. Natarajan und R. E. Boughner: On the relationship between greenhouse effect, atmospheric photochemistry, and species distribution. *J. Geophys. Res.*, 88, 1983, S. 1401-1426
- (5) Wuebbles, D. J.; F. M. Luther und J. E. Penner: Effect to coupled anthropogenic perturbations on stratospheric ozone. *J. Geophys. Res.*, 88, 1983, S. 1444-1456
- (6) Owens, A. J.; C. H. Hales; D. L. Filkin; C. Miller, J. M. Steed und J. P. Jesson: A coupled one-dimensional radiative-convective, chemistry-transport model of the atmosphere, 1. Model structure and steady-state perturbation calculations. *J. Geophys. Res.*, 90, 1985, S. 2283-2312
- (7) Sze, N. D. und M. K. W. Ko: Photochemistry of COS, CS<sub>2</sub>, CH<sub>3</sub>SCH<sub>3</sub> and H<sub>2</sub>S: Implication for the atmospheric sulfur cycle. *Atmos. Environ.*, 14, 1980, S. 1223-1239
- (8) Wang, W.-C. und N. D. Sze: Coupled effects of atmospheric N<sub>2</sub>O and O<sub>3</sub> on the earth's climate. *Nature*, 286, 1980, S. 589-590
- (9) Vupputuri, R. K. R.: Potential effects of anthropogenic trace gas emissions on atmospheric ozone and temperature structure and surface climate. *Atmos. Environ.*, 22, 1988, S. 2809-2818
- (10) Karol, I. L.: System modeling of the 'greenhouse effect' transport and photochemistry of trace gases in the atmosphere. *Izv., Atmosph. Ocean. Physics*, 16, 1980, S. 12-18
- (11) Karol, I. L. und E. V. Rozanov: Radiative-convective models of climate. *Izv., Atmosph. Ocean. Physics*, 18, 1982, S. 910-918
- (12) WMO: Scientific assessment of atmospheric ozone: 1989. Report No 20, World Meteorological Organization, Genf, 1990
- (13) Jackman, C. H.; R. K. Seals, Jr. und M. J. Prather: Two-dimensional intercomparison of stratospheric models. NASA Conference Publication 3042, Washington, D.C., 1989
- (14) Stordal, F.; I. S. A. Isaksen und K. Horntveth: A diabatic circulation two-dimensional model with photochemistry simulations of ozone and long-lived tracers with surface sources. *J. Geophys. Res.*, 90, 1985, S. 5757-5776
- (15) Gray, L. J. und J. A. Pyle: Two-dimensional model studies on equatorial dynamics and tracer distributions. *Q. J. R. Meteorol. Soc.*, 113, 1987, S. 635-651
- (16) Gidel, L. T.; P. J. Crutzen und J. Fishman: A two-dimensional photochemical model of the atmosphere 1; Chlorocar-

- bon emissions and their effect on stratospheric ozone. *J. Geophys. Res.*, 88, 1983, S. 6622-6640
- (17) Tung, K. K. und Yang: *J. Geophys. Res.* 93, 1988
- (18) Miller, C.; D. L. Filkin; A. J. Owens; J. M. Steed und J. P. Jesson: A two-dimensional model of stratospheric chemistry and transport. *J. Geophys. Res.*, 86, 1981, S. 12039-12065
- (19) Fisher, D. A.; C. H. Hales; D. L. Filkin; M. K. W. Ko; N. D. Sze; P. S. Connell; D. J. Wuebbles; I. S. A. Isaksen und F. Stordal: Model calculations of the relative effects of CFCs and their replacements on stratospheric ozone. *Nature* 344, 1990, S. 508-512
- (20) Guthrie, P. D.; C. H. Jackman; J. R. Herman und C. J. McQuillan: A diabatic circulation experiment in a two-dimensional photochemical model. *J. Geophys. Res.*, 89, 1984, S. 9589-9602
- (21) Johnston, H. S.; D. E. Kinnison und D. J. Wuebbles: Nitrogen oxides from high-altitude aircraft: an update of potential effects on ozone. *J. Geophys. Res.*, 94, 1989, S. 16351-16363
- (22) Ko, M. K. W.; K. K. Tung; D. K. Weisenstein und N. D. Sze: A zonal mean model of stratospheric tracer transport in isentropic coordinates: numerical simulations for nitrous oxide and nitric acid. *J. Geophys. Res.*, 90, 1985, S. 2313-2329
- (23) Wang, W.-C.; G. Molnar; M. K. W. Ko; S. Goldenberg und N. D. Sze: Atmospheric trace gases and global climate: a seasonal model study. *Tellus* 42 B, 1990, S. 149-161
- (24) Schneider, H. R.; M. K. W. Ko; N. D. Sze; G. Shi und W. C. Wang: An evaluation of the role of eddy diffusion in stratospheric interactive 2D models. *J. Geophys. Res.*, 46, 1989, S. 2079-2093
- (25) Garcia, R. und S. Solomon: A numerical model of zonally averaged dynamical and chemical structure of the middle atmosphere. *J. Geophys. Res.*, 88, 1983, S. 1379-1400
- (26) Brasseur, G. M. H. Hitchman; S. Walters; M. Dymek; E. Falise und M. Pirre: An interactive chemical dynamical radiative two-dimensional model of the middle atmosphere. *J. Geophys. Res.*, 95, 1990, S. 5639-5656
- (27) Brühl, C. und R. Hennig: Analyse und Bewertung der Modellsysteme zur Vorhersage von Veränderungen des Ozongehalts der Atmosphäre. Zwischenbericht FE-Vorhaben 104 02 521. Umweltbundesamt, Berlin/Mainz, 1989
- (28) Stordal, F. u. a. 1985
- (29) Brühl, C. und P. J. Crutzen 1988
- (30) Stordal, F. u. a. 1985
- (31) Dütsch, H. U.: Vertical ozone distribution on a global scale. *Pure and Applied Geophysics*, 116, 1978, S. 511-529
- (32) Brühl, C. und R. Hennig 1989
- (33) Zimmermann, P. H.; J. Feichter; H. K. Rath; P. J. Crutzen und W. Weiss: A global three-dimensional source-receptor model investigation using  $85\text{Kr}$ . *Atmos. Environ.*, 23, 1989, S. 25-35
- (34) Cunnold, D.; F. Alyea; N. Phillips und R. Prinn: A three dimensional dynamical-chemical model for atmospheric ozone. *J. Atmos. Sci.*, 32, 1975, S. 170-194
- (35) Prinn, R. G. und A. Golombek: Global atmospheric chemistry of CFC-123. *Nature*, 344, 1990, S. 47-49
- (36) Cariolle, D.; A. Lasserre-Bigorry; J.-F. Royer, J.-F. Geleyn: A general circulation model simulation of the spring-time Antarctic ozone decrease and its impact on midlatitudes. *J. Geophys. Res.*, 95, 1990, S. 1883-1898
- (37) Prather, M.; M. M. Garcia; R. Suenzo und D. Rind: Global impact of the Antarctic ozone hole: dynamical dilution with a three-dimensional chemical transport model. *J. Geophys. Res.*, 95, 1990, S. 3449-3472
- (38) Brühl, C. und P. J. Crutzen 1988
- (39) DeMore, W. B.; J. J. Margitan; M. J. Molina; R. T. Watson; D. M. Golden; R. F. Hampson; R. F. Kurylo; C. J. Howard und A. R. Ravishankara: Chemical kinetics and photochemical data for use in stratospheric modeling. *Jet Prop. Lab. Publ.* 85-37, 7, NASA, Pasadena, CA, 1985
- (40) DeMore, W. B.; M. J. Molina; S. P. Sander; D. M. Golden; R. F. Hampson; R. F. Kurylo; C. J. Howard und A. R. Ravishankara: Chemical kinetics and photochemical data for use in stratospheric modeling. *Jet Prop. Lab. Publ.* 87-41, 8, NASA, Pasadena, CA, 1987
- (41) Crutzen, P. J.; I. S. A. Isaksen und J. R. McAfee: The impact of the chlorocarbon industry on the ozone layer. *J. Geophys. Res.*, 83, 1978, S. 345-363
- (42) Zdunkowski, W. G., R. M. Welch und G. Korb: An investigation of the structure of typical two-stream-methods for the calculation of solar fluxes and heating rates in clouds. *Beitr. Phys. Atmos.*, 53, 1980, S. 147-166
- (43) Ramanathan, V.: Radiative transfer within the earth's troposphere and stratosphere: a simplified radiative convective model. *J. Atmos. Sci.*, 33, 1976, S. 1330-1346
- (44) Rodgers, J. D. und R. D. Stephens: Absolute infrared intensities for F-113 and F-114 and an assessment of their greenhouse warming potential relative to other chlorofluorocarbons. *J. Geophys. Res.*, 93, 1988, S. 2423-2428
- (45) Varanasi, P. und S. Chudamani: Infrared intensities of some chlorofluorocarbons capable of perturbing the global climate. *J. Geophys. Res.*, 93, 1988, S. 1666-1668
- (46) Ramanathan, V. 1976
- (47) Brühl, C.: Ein effizientes Modell für globale Klima- und Luftzusammensetzungsänderungen durch menschliche Aktivitäten. Dissertation, Universität Mainz, 1987
- (48) Stordal, F. u. a. 1985
- (49) Isaksen, I. S. A. und F. Stordal: Ozone perturbations by enhanced levels of CFCs,  $\text{N}_2\text{O}$  and  $\text{CH}_4$ : A two-dimensional diabatic circulation study including uncertainty estimates. *J. Geophys. Res.*, 91, 1986, S. 5249-5263
- (50) Stordal, F. und I. S. A. Isaksen: Ozone perturbations due to increases in  $\text{N}_2\text{O}$ ,  $\text{CH}_4$ , and chlorocarbons: two-dimensional time-dependent calculations. *Tellus*, 39 B, 1987, S. 333-353
- (51) Legrand, M. R.; F. Stordal und I. S. A. Isaksen: A model study of the stratospheric budget of odd nitrogen, including effects of solar cycle variations. *Tellus* 41 B, 1989, S. 413-426
- (52) Isaksen, I. S. A.; K. Mittleboe; J. Sunde und P. J. Crutzen: A simplified method to include molecular scattering and reflection in calculations of photon fluxes and photodissociation rates. *Geophys. Norv.*, 31, 1977, S. 11-26
- (53) Isaksen, I. S. A.; B. Rognerud und F. Stordal: Studies of arctic stratospheric ozone in a 2-D model including sane effects of zonal asymmetries. *Geophys. Res. Lett.* 17, 1990, S. 557-560
- (54) Lelieveld, J. und P. J. Crutzen: Influences of cloud photochemical processes on tropospheric ozone. *Nature*, 343, 1990, S. 227-233
- (55) WMO: Atmospheric ozone 1985, WMO global ozone research and monitoring project. Report No 16., World Meteorological Organization, Genf, 1986 1181 Seiten
- (56) Brühl, C. und P. J. Crutzen 1988

- (57) Madronich, S. und Weller: Numerical integration errors in calculated tropospheric photolysis rates. *J. Atmos. Chem.*, 10, 1990, S. 289-300
- (58) WMO 1990
- (59) Isaksen, I.S.A. u. a. 1990
- (60) Watson, R. T. and Ozone Trend Panel; M. J. Prather and Ad Hoc Theory Panel, M. J. Kurylo and NASA Panel for Data Evaluation, 1988: Present state of knowledge of the upper atmosphere 1988: an assessment report. NASA Reference Publication 1208. Washington, D.C.
- (61) Watson R.T., u. a. 1988
- (62) BT-Drucksache 11/2676: Entwurf eines Gesetzes zu dem Montrealer Protokoll vom 16. September 1987 über Stoffe, die zu einem Abbau der Ozonschicht führen, Bonn den 15. 7. 1988
- (63) Brühl, C. und R. Hennig 1989
- (64) Brühl, C. und P. J. Crutzen: Ozone and climate changes in the light of the Montreal protocol, a model study. *Ambio*, 6-7, 1990, S. 293-301
- (65) Brühl, C. und R. Hennig 1989
- (66) Brühl, C. und P.J. Crutzen 1990
- (67) McFarland, M., Du Pont Company, USA, persönliche Mitteilung
- (68) EK-Drucksache 11/17, 1988, S. 49
- (69) Brühl, C. und P.J. Crutzen 1990
- (70) Kavanaugh, M.: Estimates of future CO, N<sub>2</sub>O and NO<sub>x</sub> emissions from energy combustion. *Atmos. Environment*, 21, 1987, S. 463-468
- (71) Prather, M. und R.T. Watson: Stratospheric ozone depletion and future levels of atmospheric chlorine and bromine. *Nature* 344, 1990, S. 729-734
- (72) Prather, M. und R.T. Watson 1990
- (73) NRC: Causes and effects of stratospheric ozone reduction: an update. National Research Council/National Academy Press. Washington, D.C., 1982
- (74) Brühl, C. und P. J. Crutzen: On the disproportionate role of tropospheric ozone as a filter against solar UV-B radiation. *Geophys. Res. Lett.*, 16, 1989, S. 703-706

#### 4. KAPITEL

### Ozonzerstörung, Veränderungen der UV-B-Strahlung und deren Auswirkungen

#### 1. Zusammenhang zwischen Ozonkonzentration und UV-B-Strahlung

Der Ultraviolett-Anteil der Solarstrahlung wird beim Durchgang durch die Atmosphäre durch verschiedene Prozesse abgeschwächt. Ozon ist dabei ein wichtiger, aber nicht der einzige Faktor. Für den gesamten ultravioletten Strahlungsanteil ist die Streuung durch

#### 5. Tabellenverzeichnis

- Tab. 1: Einige 2-D-Chemie-Transportmodelle und deren Eigenschaften: Rückkopplungsprozesse in der Stratosphäre, Erfassung von Chemie in der Troposphäre.
- Tab. 2: Abgeschätzte Produktion der von den Reduktionsmaßnahmen betroffenen Halogenkohlenwasserstoffe 1986, gegeben in Kilotonnen (kt).
- Tab. 3: Übersicht der mit dem Mainzer Modell untersuchten Szenarien anhand charakteristischer berechneter Spurengaskonzentrationen in der Troposphäre auf der Nordhemisphäre (NH) und der Südhemisphäre (SH).

#### 6. Abbildungsverzeichnis

- Abb. 1: Beobachtete und mit dem 2-D-Modell der Universität Oslo berechnete Höhenverteilungen des Ozonmischungsverhältnisses für verschiedene Breiten und zwei Jahreszeiten.
- Abb. 2: Mit dem Osloer (UIO) und dem Mainzer (MPIC) Modell berechnete Ozonkonzentrationsänderungen für das Jahr 2050 in einem 'Montreal'-Szenario, ohne Anstieg der H-FCKW 22 Produktion.
- Abb. 3: Zeitliche Entwicklung der berechneten Chlor- (Teil a) und Bromvolumenmischungsverhältnisse (Teil b) in der Stratosphäre für die mit dem Mainzer 1½-D Modell untersuchten Szenarien.
- Abb. 4: Berechnete Entwicklung der ClX-Konzentration in der Stratosphäre für:  
Teil a: unterschiedliche Zeitpunkte der Einstellung der gesamten FCKW-Produktion (Jahre 1995, 2000, 2005);  
Teil b: Einsatz von Ersatzstoffen mit Lebensdauern von 15 Jahren (Stoff X) oder 6 Jahren (Stoff Y) für die gesamte vermiedene FCKW-Menge über 30 Jahre.
- Abb. 5: Mit dem Mainzer Modell berechnete Änderungen des Gesamtzongehalts auf der Nordhalbkugel (a) und der Südhalbkugel (b) für die Szenarien nach Abbildung 3 und Tabelle 3. Teil (c) enthält die für die Südhalbkugel berechnete Änderung des Ozons in der Stratosphäre.
- Abb. 6: Für die Nordhalbkugel mit dem Mainzer Modell berechnete Änderungen der Verteilung von Ozon und Temperatur gegenüber 1980 für die extremen Szenarien.
- Abb. 7: Berechnete Änderungen der mit der biologischen Wirksamkeit gewichteten UV-Strahlung für die berechneten hemisphärisch gemittelten Ozonänderungen der Szenarien aus Abbildung 3 und Tabelle 3.

Moleküle, Aerosole und Wolken am wichtigsten. Jedoch in einem mittleren Bereich, dem sogenannten UV-B-Bereich von 280 bis 320 nm Wellenlänge, kommt der Absorption durch Ozon besondere Bedeutung zu. In Regionen mit starker Luftverschmutzung kann die lokale UV-B-Intensität weiter durch NO<sub>2</sub> und SO<sub>2</sub> geschwächt werden. Schließlich spielt auch die Oberflächenalbedo für die UV-B-Strahlung eine nicht

vernachlässigbare Rolle. Die Änderung jeder dieser Größen hat eine Änderung der UV-Strahlung in Bodennähe zur Folge.

### 1.1 Natürliche Verteilung und Variation der UV-B-Strahlung

Die Sonne sendet ein breites Spektrum sichtbarer und unsichtbarer Strahlung aus, die im globalen Mittel pro Quadratmeter der Erdoberfläche 236 Watt beträgt. Der Maximalwert der Globalstrahlung bei klarem Himmel und senkrecht stehender Sonne beträgt am Erdboden 1,12 kW/m<sup>2</sup>. Die Verteilung auf die einzelnen Spektralbereiche ist in Tabelle 1 aufgelistet. Der dominierende Teil der Solarstrahlung (94 Prozent) entfällt zu etwa gleichen Teilen auf den sichtbaren und infraroten Spektralbereich. Der gesamte UV-Anteil ist mit etwa sechs Prozent vergleichsweise gering. Entsprechend der unterschiedlichen biologischen Wirksamkeit (vgl. Nr. 4.1) wird der UV-Anteil der Solarstrahlung unterteilt in die Bereiche UV-A, UV-B und UV-C. Während der energiereichste Bereich dieser Strahlung (UV-C) aufgrund der starken Absorption durch Ozon in der Stratosphäre überhaupt nicht bis zum Boden vordringt, kann der energieärmste Teil (UV-A) bis zum Boden vordringen, wenn auch stark durch Streuung an Luftmolekülen, Aerosolteilchen und Wolken geschwächt. Allein die am Boden ankommende Strahlung im UV-B-Bereich ist empfindlich von der Ozongesamtmenge abhängig. Ihr Anteil an der Gesamtstrahlungsstärke beträgt etwa 0,5 Prozent in Bodennähe und 1,3 Prozent außerhalb der Atmosphäre. Der Zusammenhang zwischen Strahlungsflußdichte, Ozonabsorption und einer biologischen Wirkungsfunktion (hier die Erythemwirksamkeit von UV-Strahlung; ein Erythem ist eine entzündliche Rötung der Haut, die, sofern durch Sonneneinstrahlung hervorgerufen, auch als „Sonnenbrand“ bezeichnet wird) als Funktion der Wellenlänge ist in Abbildung 1 dargestellt.

Die Strahlungsflußdichte, die ein beliebiges Oberflächenelement der unteren Atmosphäre oder die Erdoberfläche empfängt, ist die Summe aus der direkten und diffusen Strahlung. Sie wird in der Regel als Globalstrahlung bezeichnet und als eine der meteorologischen Kenngrößen an vielen Wetterstationen regelmäßig für den Wellenlängenbereich 300 bis 2800 nm gemessen.

Tabelle 1

#### Verteilung der relativen Strahlungsflußdichte der Sonne auf die einzelnen Wellenlängenbereiche in Bodennähe:

Wellenlänge [nm]	Bezeichnung	Anteil in Prozent
<280	UV-C	0
280–320	UV-B	0,5
320–400	UV-A	5,6
400–800	sichtbares Licht	51,18
>800	Infrarotstrahlung	42,1

Die direkte Strahlung ist derjenige Anteil der Solarstrahlung, den ein Betrachter (Empfänger) mit Blick auf die Sonne sieht. Sie entspricht der direkten Sonnenstrahlung außerhalb der Atmosphäre, vermindert um die Anteile, die durch Absorption und Streuung entlang des Weges verloren gehen.

Die diffuse Strahlung ist die Summe der einfach und mehrfach an Molekülen, Teilchen und Wolkentröpfchen gestreuten Strahlung, die zum Teil auch an der Oberfläche reflektiert wurde. Da die Molekülstreuung (Rayleigh-Streuung) stark von der Wellenlänge abhängt – bei Verdoppelung der Wellenlänge nimmt sie auf ein Sechzehntel ab – ist die Streuintensität bei kurzen Wellenlängen im nahen UV-Bereich von 360 bis 400 nm am stärksten. Sie sorgt dafür, daß dort der Anteil der diffusen Strahlung an der Gesamtstrahlung auch bei wolkenlosem Himmel bis zur Hälfte betragen kann. Bei längeren Wellenlängen (oberhalb von 500 nm) ist der Beitrag der Streustrahlung zur Gesamtstrahlung erheblich geringer.

Ein weiterer Faktor, der die Sonnenstrahlung schwächt, ist die Extinktion (Absorption und Streuung) durch Aerosol-Teilchen, Wolkentröpfchen und Eiskristalle in Wolken. Die Absorption und die Streuung sind in diesem Fall abhängig von der Teilchengröße und -konzentration und ihrer chemischen Zusammensetzung. Die Wellenlängenabhängigkeit der Streuung durch Aerosol-Teilchen ist erheblich schwächer als die der Streuung durch Moleküle und bei Wolken praktisch nicht vorhanden. Für die Rückstreuung des Sonnenlichts durch Wolken wird in der Regel angenommen, daß sich die Strahlungsstärke in der Nähe der Erdoberfläche um einen konstanten Faktor, unabhängig von der Wellenlänge, ändert. Dies gilt recht gut für den UV-B-Anteil der Strahlung. Typische Werte der UV-B-Strahlungsflußdichte sinken bei vollständig bedecktem Himmel oft weit unter der Hälfte des Wertes bei wolkenlosem Himmel (2).

Die UV-B-Strahlung, die von der Sonne ausgeht, wird im wesentlichen durch die Absorption durch das Ozon in Stratosphäre und Troposphäre geschwächt, aber auch durch Streuung und Reflexion an Molekülen, Aerosolteilchen und Wolken. Eine Abnahme des Ozons in der Stratosphäre führt bei sonst unveränderten Bedingungen immer zu einer Zunahme der bodennahen UV-B-Intensität (vgl. Nr. 1.2). Ein besonderer Fall tritt jedoch ein, wenn gleichzeitig die Ozonkonzentration in der Troposphäre zunimmt, so daß die Ozonabnahme in der Stratosphäre teilweise kompensiert werden kann, wenn sich also die Vertikalverteilung des Ozons verschiebt. In diesem Fall wird durch die stärkere Streuung der direkten Strahlung an Teilchen und Molekülen in der Troposphäre die effektive Weglänge für UV-B-Strahlung soweit erhöht, daß eine verstärkte Absorption durch das Ozon in niedrigen Luftschichten möglich wird (3). Als Folge kann die UV-B-Intensität in Bodennähe trotz einer Abnahme der Ozongesamtsäule abnehmen.

Die UV-B-Globalstrahlung, von irgendeinem Ort der Erde aus beobachtet, hängt von der durchstrahlten Ozonmenge ab, also von der Ozonsäulendichte und dem Zenitwinkel. Beide Größen ändern sich mit der geographischen Breite sowie der Tages- und Jahreszeit. In tropischen Breiten ist die UV-B-Intensität we-



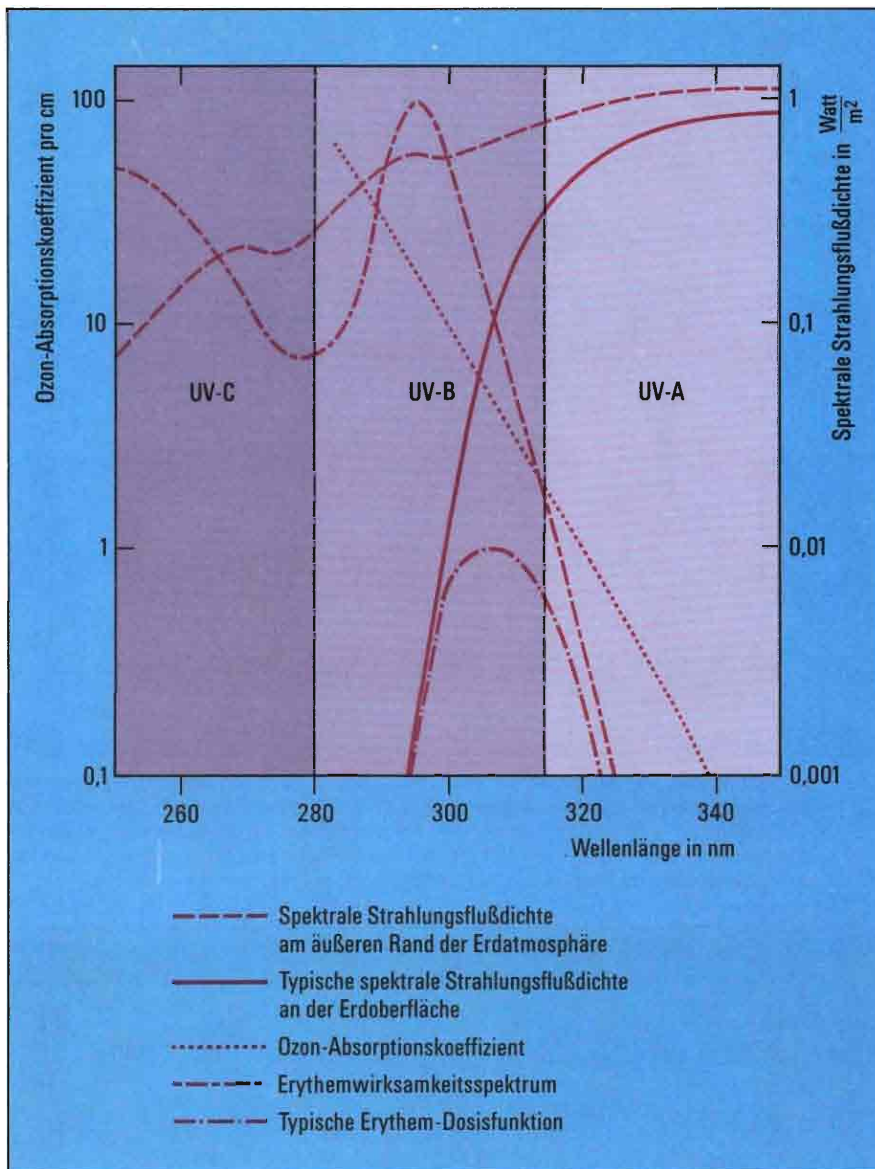


Abb. 1: Wellenlängenabhängigkeit von Absorptionskoeffizient des Ozons und relativer Erythemwirksamkeit im nahen UV-Bereich (1).

gen des hohen Sonnenstandes und der relativ niedrigen Ozonsäulendichten am größten. Darüber hinaus ist die Schwankung mit der Jahreszeit gering. In gemäßigten und höheren Breiten, in denen sich sowohl der Zenitwinkel als auch die Ozonkonzentration im Laufe des Jahres stark ändert, ändert sich entsprechend stark die UV-B-Intensität. Abbildung 2 zeigt den typischen Verlauf des Jahresgangs der relativen UV-B-Intensität, gemessen auf dem Jungfrauoch. Diese Kurve ist um die Sommersonnenwende nicht vollkommen symmetrisch, da wegen der natürlichen Schwankungen die Ozonsäulendichte in diesen Breiten im Herbst geringer ist als im Frühjahr (vgl. Kapitel 1, Nr. 2.4).

Die Kurve der Abbildung 2 ist das Ergebnis der Änderungen von Sonnenstand und Ozonkonzentration.

Diese Effekte können mit Beobachtungsmethoden, die Wellenlängenbereiche zusammenfassen (integrieren), nicht voneinander unterschieden werden, sondern nur durch Berechnungen mit bekannten Ozonabsorptionskoeffizienten. Das Ergebnis ist die spektrale Globalstrahlung als Funktion von Zenitwinkel und Ozonsäulendichte, die in Abbildung 3 dargestellt wird. Aus ihr folgt:

- Die Strahlungsstärke im UV-B-Bereich ist wesentlich stärker von der Sonnenhöhe abhängig als die Gesamtstrahlung. Daraus folgt, daß der Anteil der UV-B-Intensität an der Gesamtstrahlung, unabhängig von der Ozonsäulendichte, vom Äquator zu den Polen hin stark abnimmt.

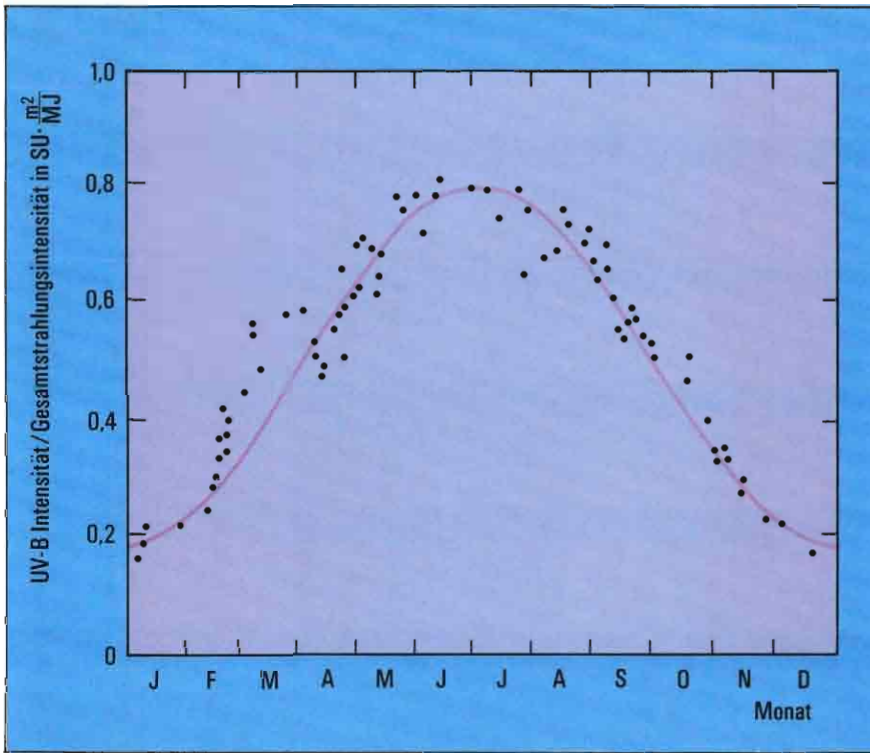


Abb. 2: Jahrgang der Tagesmittelwerte des Verhältnisses UV-B zu Globalstrahlung, gemessen am Jungfraujoch (4). Die angegebene Kurve ist eine angepaßte Sinusfunktion. SU = Sunburn unit; 1 SU entspricht der Schwellendosis für die Entstehung eines Erythems. Die Einheit SU/ (MJ m<sup>2</sup>) gibt an, wieviele UV-B-Dosen, die gerade noch Sonnenbrand auslösen, pro Megajoule (MJ) Energie auf den Quadratmeter einfallen.

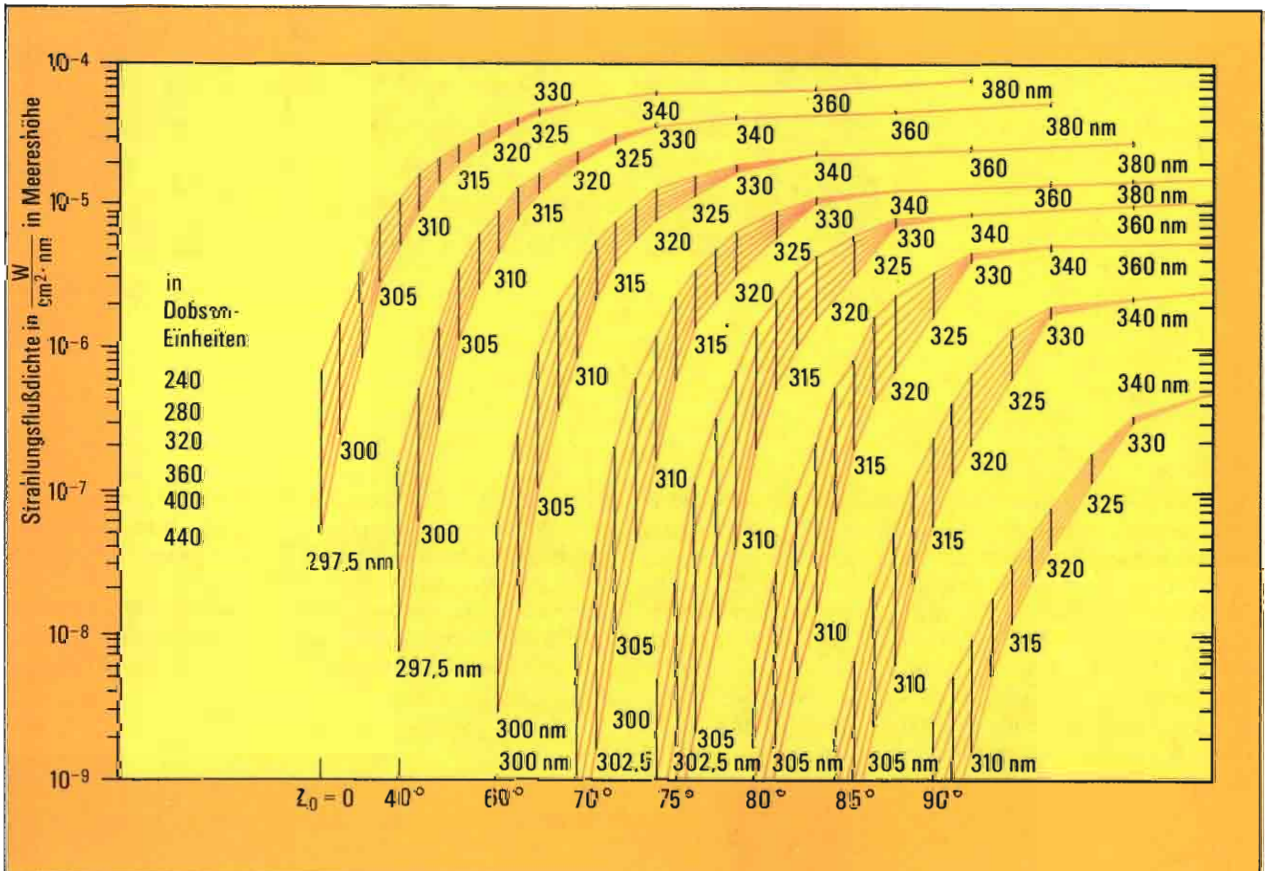


Abb. 3: Berechnete spektrale UV-Globalstrahlung in Meereshöhe und für wolkenlosen Himmel bei acht verschiedenen Zenitwinkeln und jeweils sechs Werten der Ozongesamtsäulendichte von 240 bis 440 Dobson-Einheiten (5).

– Der Einfluß der Ozonsäulendichte auf die UV-B-Intensität ist bei niedrigem Sonnenstand relativ größer als bei hohem Sonnenstand. Daraus folgt, daß vergleichbare Ozonabnahmen in höheren Breiten eine stärkere relative Zunahme der UV-B-Intensität zur Folge haben als in niederen Breiten.

### 1.2 Ozonabnahme und berechnete Änderungen der UV-B-Intensität

Der Ozongehalt der Atmosphäre hat seit Beginn der siebziger Jahre abgenommen. Die extremsten Abnahmen wurden in der Südpolarregion beobachtet, aber auch in allen anderen Gebieten hat sich der Ozongehalt geändert. In der Nordhemisphäre zum Beispiel ist

eine Ozonabnahme bis zu mehreren Prozent pro Dekade eindeutig dokumentiert (vgl. Kapitel 1, Nr. 1.2). Daraus folgt, daß bei sonst unveränderten Bedingungen die UV-B-Intensität in der Nähe der Erdoberfläche zugenommen haben sollte.

Der UV-B-Bereich ist zwar nur ein schmaler Spektralbereich, in ihm ändert sich aber die Strahlungsflußdichte stark. Allein im Bereich von 295 bis 305 nm Wellenlänge nimmt der Photonenfluß um mindestens drei Größenordnungen zu (vgl. 1. Kapitel, Nr. 2.2.1, Abbildung 11). Da die Wirkung einer Ozonänderung stark wellenlängenabhängig ist, wird bei einer Änderung der Ozonsäulendichten die Strahlung am kurzwelligeren Ende am stärksten beeinflusst. Eine Abnahme der Ozonkonzentration um 50 Prozent zum

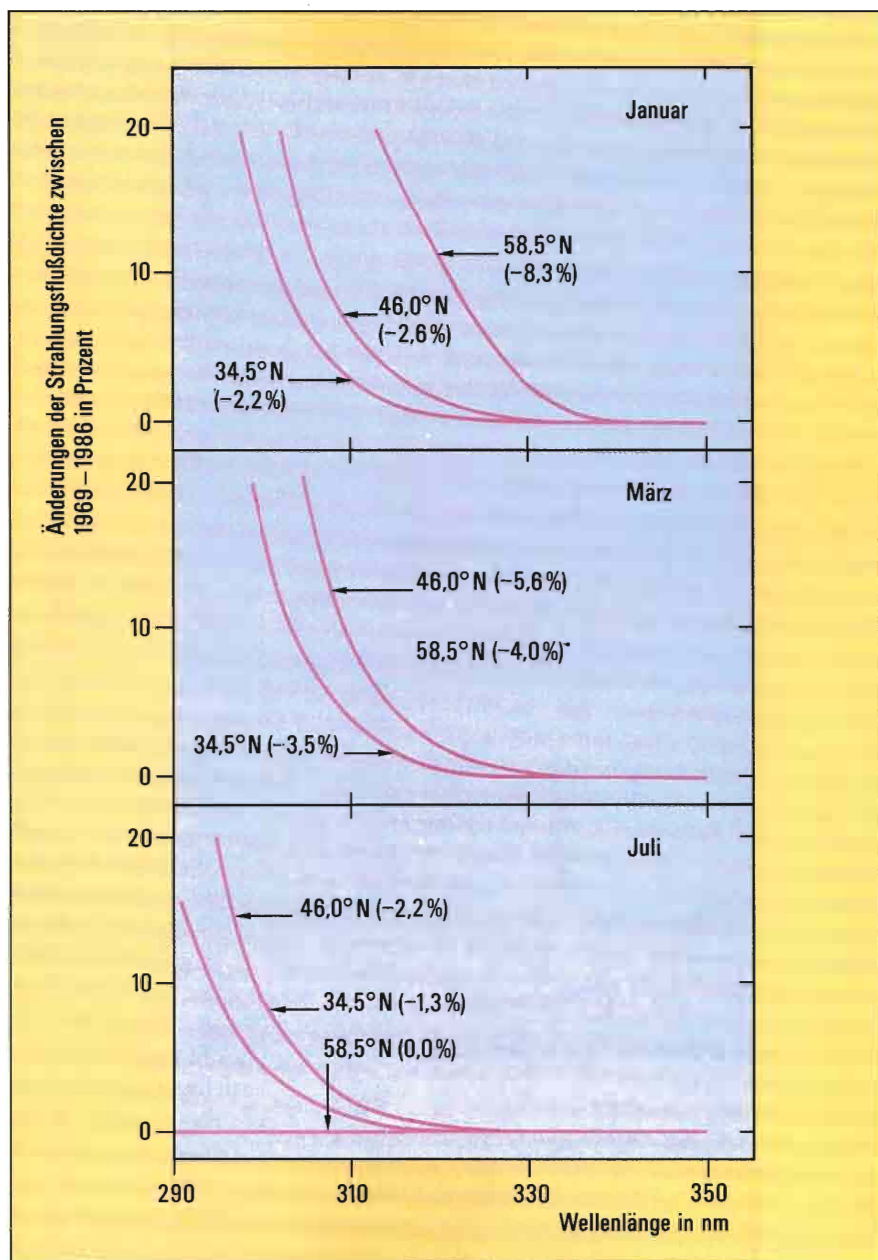


Abb. 4: Berechnete Änderungen der relativen spektralen Strahlungsflußdichte im UV-B-Bereich für die Monate Januar, März und Juli als Folge der im Zeitraum 1970 bis 1986 gemessenen Abnahmen der Ozonsäulendichte (prozentuale Abnahme angegeben in Klammern) in verschiedenen geographischen Breiten der Nordhemisphäre (7).

Beispiel steigert die Strahlungsflußdichte bei 320 nm nur um 20 Prozent, während sie bei 295 nm um einen Faktor 100 ansteigt. Diese starke Wellenlängenabhängigkeit ist sowohl für die Messung der UV-B-Intensität und -Änderung (Bandbreite des Meßgerätes) als auch für die biologische Auswirkung (Wirkungsfunktion) von großer Bedeutung (vgl. Nr. 4.1).

Abbildung 4 zeigt die für die beobachteten Ozonänderungen in der Nordhemisphäre im Zeitraum von 1970 bis 1986 mit Hilfe eines Strahlungsübertragungsmodells berechneten relativen Änderungen der Strahlungsintensität als Funktion der Wellenlänge im UV-B-Bereich. Diese Berechnung gilt für die Mittagszeit und für wolkenlosen Himmel. Es wurde weiterhin nur die Änderung der Gesamtsäule betrachtet; eine mögliche Verschiebung in der Vertikalverteilung durch die Zunahme des Ozons in der Troposphäre, die die Zunahme der Strahlungsflußdichte abschwächen würde, blieb unberücksichtigt.

Die Ergebnisse dieser Berechnung bestätigen die Erwartung, daß die prozentuale Änderung der Strahlungsflußdichte

- mit abnehmender Wellenlänge (in den meisten Fällen nahezu exponentiell) und
  - mit abnehmendem Sonnenstand
- zunimmt.

Für Wellenlängen oberhalb von 330 nm hat eine Ozonabnahme praktisch keinen Einfluß auf die Strahlungsflußdichte.

Ähnliche Berechnungen der Änderung der UV-B-Intensität wurden auch bei Wellenlängenintegration und unter Beachtung der Empfindlichkeit von DNA (Desoxyribonukleinsäure, engl. Desoxyribonucleic acid; sie stellt den chemischen Träger der Erbinformation in der Zelle dar), von Pflanzen und des Robertson-Berger-Spektrometers (einem Meßgerät mit dem die für die Entstehung von Sonnenbrand wirksamen UV-Dosen aufgezeichnet werden) durchgeführt. Die berechneten Änderungen der Strahlungsflußdichten sind für DNA und Pflanzen höher als für Spektrometer. Absolute Änderungen der Strahlungsflußdichten sind Berechnungen zufolge — im Gegensatz zu den relativen Änderungen — für die stark mit abnehmender Wellenlänge zunehmenden Empfindlichkeitskurven der DNA und der Pflanzen am größten in tropischen Breiten (6).

## 2. Messungen der UV-B-Intensität

### 2.1 Ergebnisse direkter Beobachtungen

Messungen der UV-B-Globalstrahlung werden seit vielen Jahren an verschiedenen Orten ausgeführt. Die Qualität der verwendeten Geräte und die Meßgrößen (Gesamt-UV-B-Energie, Wellenlängenabhängigkeit, wirkungsbezogene Energie) sind aber sehr unterschiedlich. Die Zahl systematischer und vergleichbarer Messungen ist außerordentlich gering.

Das Robertson-Berger-(RB)-Spektrometer wird seit 1974 in einem Meßnetz von zur Zeit etwa 14 Stationen als bodengebundenes Meßsystem der erythemwirk-

samen UV-B-Strahlung verwendet. Der Schwerpunkt dieses Meßnetzes liegt in den USA; es existieren aber auch RB-Meßstationen in Australien und Europa (Davos, Belsk). Das Management des Meßnetzes liegt in den Händen des Health Science Center der Temple University in Philadelphia. Die Ergebnisse von acht Stationen dieses Meßnetzes in den USA zwischen 30,4 und 46,8 Grad nördlicher Breite im Zeitraum von 1974 bis 1985 wurden 1988 im Hinblick auf einen möglichen Trend der UV-B-Intensität analysiert (8). Überraschenderweise zeigte keine der Meßstationen eine Zunahme des UV-B-Strahlungsflusses innerhalb dieses Zeitraums; im Gegenteil, an fünf der acht Stationen wurden sogar statistisch signifikante Abnahmen beobachtet.

Diese Analyse basiert auf integralen jährlichen UV-B-Flußmessungen. Da der größte Beitrag zu diesem integralen Fluß aus den Sommermonaten stammt (vgl. Abbildung 2), die Sommermonate aber den geringsten Trend in der Ozonkonzentration zeigen, ist diese Form der Analyse allein nicht adäquat. Auch die Analyse des Trends der einzelnen Monatsmittelwerte der UV-B-Messungen zeigte keinerlei Zunahme über den Zwölf-Jahres-Zeitraum. Diese scheinbare Inkonsistenz mit den Ozontrenddaten ist vermutlich auf die begrenzte spektrale Auflösung des RB-Spektrometers zurückzuführen. Dieses Spektrometer empfängt auch Wellenlängen, die praktisch durch die Ozonsäulendichte nicht beeinflußt werden. Darüber hinaus kann nicht ausgeschlossen werden, daß durch zunehmenden Aerosolgehalt und lokale Luftverschmutzung (NO<sub>2</sub>, SO<sub>2</sub>), gemeinsam mit einer Zunahme des Ozons in der Troposphäre, die Zunahme der UV-B-Strahlungsflußdichte infolge Änderung der Ozon-Gesamtsäule kompensiert wurde.

Im Gegensatz zu diesen Meßreihen in der USA wurde kürzlich anhand einer achtjährigen Meßreihe auf dem Jungfraujoch (47° N, 3576 m über NN) zwischen 1981 und 1989 über eine lineare Zunahme der UV-B-Strahlungsstärke von etwa einem Prozent pro Jahr berichtet (9). Zur Messung der UV-B-Strahlung wurde ebenfalls das relativ breitbandige Spektrometer verwendet. Die Daten wurden in Form des Verhältnisses UV-B/Gesamtstrahlung behandelt und als Residuen gegenüber dem langjährigen Mittel des Jahresverlaufs analysiert. Der beobachtete Trend ist überraschend stark. Selbst wenn angenommen wird, daß die Station Jungfraujoch aufgrund der Höhe weit weniger stark durch zunehmenden Aerosolgehalt und Ozon in der Troposphäre belastet ist als alle Stationen des Meßnetzes der USA, sind die Beobachtungen kaum konsistent mit dem bekannten Trend der Ozongesamtsäule. Dieser Trend wurde für das betreffende Breitenband in Europa mit minus 1,5 Prozent pro Dekade im ganzjährigen Mittel angegeben. Obwohl eine Analyse der Dobson-Daten der benachbarten Station

Arosa alleine zu einem leicht höheren Trend führt (minus vier Prozent im Zeitraum 1969 bis 1988 entsprechend etwa minus zwei Prozent pro Dekade), kann kaum von einer Konsistenz mit den berichteten UV-B-Trends gesprochen werden (10). Das verwendete RB-Spektrometer kann wegen seiner relativen Breitbandigkeit UV-B-Intensität und Ozongesamtsäule bestenfalls im Verhältnis eins zu eins abbilden, so daß ein beobachteter UV-B-Trend nicht den Ozontrend

übersteigen sollte (11). Zusätzlich ist zu bemerken, daß bei der Untersuchung die Wechselwirkung zwischen Aerosolgehalt und Wellenlängenabhängigkeit der atmosphärischen Streuprozesse nicht berücksichtigt wurde.

Die UV-B-Intensität wurde im Jahr 1988 durch ein Wissenschaftlerteam der Universität Chicago auch an der Station Palmer (64,8 °S) auf Anvers Island, westlich der antarktischen Halbinsel, erstmals während und nach der Ausbildung des Ozonlochs beobachtet (12). Bei Wellenlängen zwischen 335 und 345 nm – hier ist die Absorption durch das Ozon vernachlässigbar – nahmen die Bestrahlungsstärken im Zeitraum vom 19. September bis zum 21. Dezember 1988 in der aufgrund des zunehmenden Sonnenstands erwarteten Weise zu. Bei Wellenlängen unterhalb 310 nm dagegen machte sich die Ausbildung des Ozonlochs deutlich bemerkbar: Die am 21. Oktober zur Zeit der maximalen Ausbildung des Ozonlochs beobachteten Strahlungsstärken im UV-B-Bereich waren deutlich höher als im Dezember, dem Monat mit dem höchsten Sonnenstand.

## 2.2 Ursachen potentieller Differenzen zwischen UV-B-Meßwerten und -Modellergebnissen

Zu den Ursachen potentieller Differenzen zwischen UV-B-Meßwerten und Modellergebnissen zählen auf der einen Seite die Meßgeräte-Schwächen, wie zum Beispiel die unzulängliche spektrale Bandbreite (Spaltfunktion), Cosinusfehler, Temperaturdriften, Alterungseffekte etc.) sowie Instabilitäten des Kalibriersystems. Bei der Modellierung der UV-B-Intensität hängt die Unsicherheit der Ergebnisse vor allem von der unzureichenden Kenntnis der Eingangsvariablen ab. Im Falle des Ozongehalts ist für präzise Berechnungen das Höhenprofil der Ozonkonzentration erforderlich. Dabei sollte besonders die Zunahme des Ozons in der Troposphäre beachtet werden (13).

Bewölkung schwächt die UV-B-Globalstrahlung; die Schwächung kann aber von der der Gesamtglobalstrahlung abweichen (14). Es liegt die Annahme nahe, daß Schwächungseffekte auch von der Wolkengattung abhängen. Bei hohen Bedeckungsgraden steigt häufig der relative UV-B-Anteil an der Globalstrahlung.

Die Streuung an Luftmolekülen steigt mit dem Luftdruck; Luftdruckschwankungen von einem Prozent sollten für die Globalstrahlung bei 300 nm Schwankungen von weniger als einem Prozent liefern.

Die optischen Eigenschaften des Aerosolspektrums können sich mit der Windrichtung und Luftmasse schnell ändern; daraus ergeben sich auch Schwankungen der UV-B-Globalstrahlung, die zwar nur eine relativ geringe spektrale Abhängigkeit aufweisen, aber – je nach Aerosolgehalt – zehn Prozent und mehr betragen können (15).

## 2.3 UV-B-Meßtechnik

Die Meßtechnik der solaren UV-Strahlung umfaßt den Wellenlängenbereich von 295 bis 330 nm. Dieser Wellenlängenbereich liegt etwa zwischen der kurzwelli-

gen Meßgrenze und dem langwelligen Ende der Hugins-Bande, also im Gebiet der Ozonabsorption.

Der UV-Bereich von mehr als 330 nm Wellenlänge wird eliminiert, weil nur wenige Strahlungswirkungen von Bedeutung bekannt sind. Darüber hinaus kann die Energie in Spektralintervallen häufig aus Meßwerten der gesamten Sonnenstrahlungsenergie und Modellrechnungen mit zufriedenstellender Genauigkeit abgeleitet werden. Der eingegrenzte UV-Bereich stellt vor allem wegen der Ozonabsorption besonders hohe Anforderungen an die Meßtechnik. Diese Anforderungen sind nötig wegen

- der stark veränderlichen Spektralverteilung (mit Sonnenhöhe und Jahreszeit);
- des überexponentiellen Abfalls der spektralen Bestrahlungsstärke mit abnehmender Wellenlänge;
- des geringen prozentualen Anteils an der Gesamtsonnenstrahlung.

Je nach Meßziel kann man durch geeignete Wahl des Empfängers des Meßgeräts die folgenden wichtigen Strahlungsgrößen erfassen:

- Direkte Sonnenstrahlung (Ebener, sonnen-nachgeführter Empfänger mit Kollimator-Tubus; z. B. für Ozongehaltsbestimmung)
- Globalstrahlung (Empfang aus gesamtem Halbraum auf horizontale Ebene; Problem: „Cosinus-Fehler“; für Strahlungshaushaltsbestimmung);
- Diffuse Sonnenstrahlung (wie Globalstrahlung, jedoch mit Sonnenabschattung durch Ring oder nachgeführte Scheibe);
- Hemisphärische Sonnenstrahlung (wie Globalstrahlung, aber auf die geneigte Empfangsebene; Einbezug der reflektierten Sonnenstrahlung; für biologische Meßziele, Materialalterung);
- Aktinische Sonnenstrahlung (Strahlungsempfang auf Kugeloberfläche; Meßziele in: Biologie, Luftchemie, Aerosolphysik).

Je nach Meßziel können

- breitbandige Messungen,
- wirkungsbezogene Messungen oder
- schmalbandige Messungen

erforderlich sein.

Die Aussagekraft breitbandiger Messungen wird oft falsch eingeschätzt, wenn es sich, wie zum Beispiel im Falle des UV-B-Bereichs, um spektral stark veränderliche Strahlung handelt und die Korrelation mit einer wellenlängenabhängigen Wirkung untersucht werden soll. Die höchsten Energiewerte, die häufig nicht am Spektralort der höchsten Wirkung liegen, dominieren den Meßwert. Andererseits sind auch die meßtechnischen Anforderungen groß, wenn genaue Ergebnisse erzielt werden sollen (gleichmäßige Empfindlichkeit über den Bereich und sprungartiger Abfall an dessen Grenzen).

Wirkungsbezogene Messungen als Einkanal-Messungen über den effektiven Bereich erfordern die Si-

mulation der spektralen Wirkungsfunktion durch optische und opto-elektronische Bauelemente. Die Genauigkeit der Simulation bestimmt wesentlich den Meßfehler. Wirkungsbezogene Ergebnisse lassen sich meist genauer ableiten, wenn man in vielen schmalbandigen Spektralintervallen des Wirkungsbereichs die spektralen Strahlungsenergien mißt.

Die Messung der spektralen UV-Strahlung in einer größeren Anzahl von schmalbandigen Meßkanälen ist immer dann notwendig, wenn es um die Bestimmung der effektiven Strahlungsenergien für mehrere Wirkungen geht oder erst eine Wirkungsfunktion zu bestimmen ist. Es sind Monochromatoren einzusetzen, an deren optische Qualität mit kürzeren Wellenlängen immer höhere Anforderungen zu stellen sind. Wenn die Transmissionsfunktionen der einzelnen Spektralkanäle genau vermessen sind, kann man mittels mathematischer Methoden („Deconvolution“) die Verfälschung der Meßwerte durch die Bandbreite der Kanäle reduzieren. Ein Problempunkt der multispektralen Messungen ist das Erreichen einer möglichst gleichzeitigen Kanalabfrage, zumindest im Falle schnell wechselnder UV-Einstrahlung bei bewölktem Himmel.

### 2.3.1 Beschreibung und Bewertung der Meßverfahren und -geräte

An die Technik der Messung der solaren UV-B-Strahlung werden – besonders im Hinblick auf spektrale Reinheit und Empfindlichkeit, und mit abnehmender Wellenlänge zunehmend – sehr hohe Anforderungen gestellt. Sie sind bedingt durch die mit Sonnenhöhe und Jahreszeit stark veränderliche Spektralverteilung, den überexponentiellen Abfall der spektralen Bestrahlungsstärke mit abnehmender Wellenlänge und den geringen prozentualen Anteil an der Gesamtsonnenstrahlung.

Wenn Allwetterbetrieb notwendig ist, sind zusätzlich die Wetterfestigkeit des Empfängers sowie – bei multispektralen Messungen – eine hohe Abfrage-Rate zu fordern, um die Messungen weitestmöglich zu synchronisieren.

Es gibt eine Gruppe von relativ einfachen Meßgeräten, zu denen vor allem auch die Geräte zählen, die zur Messung der erythemwirksamen Globalstrahlung konzipiert sind. Die technisch aufwendigeren, mit dispergierenden Monochromatoren ausgerüsteten, computergesteuerten Meßsysteme bilden eine zweite Gruppe. Sie erlauben durch Wellenlängen-Scanverfahren multispektrale Messungen, sind aber im allgemeinen nicht für genaue UV-B-Messungen ausgelegt. Eine wetterfeste Version ist meist nicht im Lieferprogramm.

Eine Ausnahme in dieser Gruppe stellt das „Brewer Ozone Spectrophotometer“ dar, das seit etwa neun Jahren als automatisches Meßgerät für den atmosphärischen Ozongehalt auf dem Markt ist und als Alternative zum Dobson-Spektralphotometer immer mehr Verbreitung findet. In der Version MARC II erlaubt es auch zusätzlich die spektrale Vermessung der UV-Strahlung zwischen 290 nm (nominell) und 320 nm mit einer Halbwertsbreite von 0,7 nm innerhalb von etwa

fünf Minuten bei 0,5 nm-Schritten (16). Das Gerät ist computergesteuert und erlaubt die Messung der direkten Sonnenstrahlung oder der Globalstrahlung. Es gilt als wetterfest erprobt. Der besondere Vorteil ist, daß man nacheinander Ozongehalt und die spektrale UV-B-Strahlung messen kann. Verbesserungen sind denkbar im Falle des Cosinusfehlers des Eintrittskopfes, beim Kalibrierverfahren und bei der Thermatisierung; der Einsatz eines Doppelmonochromators wäre für genauere Messungen unterhalb von 300 Wellenlänge nm zu erwägen.

Die Kalibrierung der spektralen Empfindlichkeit der UV-B-Empfänger erfolgt meist über Wolfram-Halogen-Lampen, die den Nachteil der besonders schnellen Alterung im UV-B-Bereich und des hohen Anteils an langwelliger Strahlung besitzen. Ferner werden Quecksilberlinien-Strahler und Deuteriumlampen eingesetzt, die im allgemeinen geringe Strahlstärken aufweisen. Für besonders genaue Kalibrierungen sollte auch die Synchrotron-Strahlung der Teilchenbeschleuniger einsetzbar sein.

Die Kalibriergenauigkeit von Wolfram-, Quecksilber- und Deuterium-lampen liegt im Bereich um 300 nm bei etwa  $\pm 3$  Prozent, für Synchrotron-Strahlung bei etwa  $\pm 1$  Prozent (17).

Die Genauigkeit der angewandten UV-B-Meßmethode ist von Fall zu Fall verschieden. Es kann aber generell gesagt werden, daß spektrale Meßsysteme bei 300 nm mit einer absoluten Meßunsicherheit und Instabilität von etwa  $\pm 10$  Prozent beziehungsweise  $\pm 5$  Prozent realisierbar sind.

Im Hinblick auf UV-B-Trend-Untersuchungen sind Verbesserungen vor allem der Stabilität anzustreben. Sie sollten in erster Linie durch verbesserte Kalibrierverfahren erreichbar sein.

Das Auswahlkriterium für die nachfolgend genannten UV-Meßgeräte ist überwiegend ihr erprobter Einsatz zur Messung der solaren UV-Strahlung.

#### 1. Einfache Geräte

##### a) Typ RM2

Meßverfahren:

2-Kanal-Photodioden-Empfänger mit Filtern

Meßunsicherheit:

8 Prozent Kalibrierunsicherheit

Nutzer:

Umweltbundesamt, Frankfurt/Main

#### 2. Wirkungsbezogene UV-Meßgeräte

##### a) Model 500 A Weatherproof Sunburn UV Meter (Robertson-Berger-Spektrometer)

Meßverfahren:

Selektierende Umwandlung von UV-Strahlung in sichtbare Strahlung mittels Phosphor; Nachweis mit gefilterter Photodiode

**Simulierte Wirkung:**

Erythemschwellenwirkungsfunktion „MED“ auf menschliche Haut

**Meßunsicherheit:**

keine Angabe

**Nutzer:**

Globales Meßnetz mit Vorgänger-Typen (seit 1973). Intensive Auswertung in Arbeiten des Instituts für Medizinische Physik der Universität Innsbruck und in Arbeiten der Polnischen Akademie der Wissenschaften in Belsk (Polen); Vergleichende Untersuchungen beim Schwedischen Wetterdienst (SMHI, Norrköping)

b) UV-B-Meßgerät Typ MOH des Deutschen Wetterdienstes, MetObs Hamburg

**Meßverfahren:**

Simulation der langwelligen Flanke der Erythemschwellenwirkungsfunktion durch Spezial-Interferenzfilterkombination; Nachweis durch UV-empfindlichen Photomultiplier (thermostatisiert)

**Meßunsicherheit:**

etwa 10 Prozent für Sommerwerte (ohne Kalibrierlampen-Probleme)

**Nutzer:**

Forschungsstellen des Deutschen Wetterdienstes

### 3. Schmalbandige UV-Meßgeräte

Die Schmalbandigkeit der Spektralkanäle, gemessen in Halbwertsbreiten, sollte abgestimmt sein auf die Flankensteilheit der spektralen UV-Kurven. Das bedeutet für die spektrale Globalbestrahlungsstärke bei 300 nm eine Halbwertsbreite von etwa einem Nanometer. Durch Messung in mehreren Kanälen ergibt sich die Möglichkeit, auch größere Breiten zu tolerieren, da Korrekturmöglichkeiten bestehen.

Für Einkanal-Messungen werden im allgemeinen Filter-Geräte eingesetzt, für Multikanal-Messungen Monochromatoren mit dispergierenden Optiken.

a) Brewer Ozone Spectrophotometer

**Meßverfahren:**

Meßbetrieb umschaltbar von Ozon-Messung (5 feste Wellenlängen von 306,3 nm bis 320,1 nm) auf UV-Messung; Einfach-Gittermonochromator mit NiSO<sub>4</sub> Vorfilterung; Scannen des Spektralbereichs zwischen 290 nm und 320 nm durch Verstellen des optischen Gitters

**Meßunsicherheit:**

keine Angabe

**Nutzer:**

Als Ozon-Meßgerät rund um die Welt eingesetzt; als UV-Meßgerät unter anderem auch am Meteorologischen Observatorium Hohenpeißenberg, Deutscher Wetterdienst (hiermit auch Beteiligung am Bayerischen Klimaforschungsprogramm geplant) und beim Schwedischen Wetterdienst (SMHI)

b) Modell 742 High Accuracy UV-Visible Spectroradiometer

**Meßverfahren:**

Gitter-Doppelmonochromator (200 nm bis 800 nm); Detektor: UV-Photomultiplier (S-20 Kathode); Computer-Steuerung des Meßbetriebs

**Meßunsicherheit:**

keine Angabe

**Nutzer:**

Universität Karlsruhe; Schwedisches Strahlenschutzinstitut Stockholm

c) LI-1800 Portable Spectroradiometer

**Meßprinzip:**

Einfach-Gittermonochromator plus Vorfilter-Rad für Spektralbereich 300 nm bis 850 nm; Bandbreite 4 nm (auch 2 nm auf Wunsch); Scan-Zeit für Gesamtspektrum: ca. 20s; Detector: Silikon-diode; Computer-Steuerung

**Genauigkeit:**

Kalibriergenauigkeit bei 300 nm: ±10 Prozent

**Nutzer:**

zum Beispiel Solar Energy Research Institute, Golden, Colorado. Speziell für UV-Messungen: University of Nottingham, England

d) „Seckmeyer“-Spektralradiometer (in Entwicklung bei der Gesellschaft für Strahlen- und Umweltforschung in München

Dieses Spektralradiometer besitzt durch den Einsatz eines Doppelmonochromators (M 300-Serie) und eines Strahlzerhackers mit selektivem Verstärker sowie durch sorgfältige Temperaturstabilisierung eine sehr hohe Empfindlichkeit und Wellenlängenauflösung. Das Gerät sollte auch unterhalb 300 nm noch eine beträchtliche Genauigkeit aufweisen (18).

### 2.3.2 Meßvorhaben und Meßstationen

Gliedert man die UV-B-Meßvorhaben nach der spektralen Auflösung, oder besser nach den in den Meßgeräten realisierten spektralen Bandbreiten, so kann man drei Gruppen unterscheiden:

Gruppe a: Messungen der Energie im UV-B-Bereich oder Unterbereichen: Die spektrale Bandbreite liegt oberhalb 10 nm, die Anzahl der Meßkanäle ist gering (unter 4, meist 1 oder 2);

Gruppe b: Messungen der spektralen Energie: die spektralen Bandbreiten liegen im allgemeinen zwischen 0,5 nm und 5 nm; die Anzahl der Meßkanäle ist groß (mindestens 5, meistens mehr als 10);

Gruppe c: Messungen der wirkungsbezogenen Energie: die spektrale Bandbreite, genau gesagt, die Breite des Spektralkanals in allen Niveaus des Durchlässigkeitsgrads wird an den spektralen Verlauf einer speziellen UV-Wirkung angepaßt. Es handelt sich um eine Einkanal-Messung.

Die Anzahl der Vorhaben mit systematischen Messungen ist außerordentlich gering.

Im Falle der Gruppe a) ist nur ein Vorhaben des Umweltbundesamts bekannt, bei dem an den 5 Meßstellen (Schauinsland, Deuselbach, Brotjackriegel, Wald-

hof und Westerland) seit Anfang 1987 Halbstundenwerte der UV-B-„Gesamt-Energie“ registriert werden. Es werden Zweikanal-Meßgeräte eingesetzt, deren resultierende Halbwertsbreite sich über den gesamten UV-B-Bereich, also über 35 nm, erstreckt. Vor allem aufgrund von Kalibrierungsschwierigkeiten können die Meßwerte eher qualitativ und weniger quantitativ ausgewertet werden.

Zur Gruppe b) zählt ein langjähriges Meßvorhaben (1975 bis 1985) des Smithsonian Radiation Biology Laboratory, bei dem an den drei Stationen Panama, Rockville und Fort Barrow mit einem Acht-Kanal-Interferenzfilter-Radiometer Bestrahlungsstärken zwischen 285 nm und 320 nm gemessen wurden. Die Halbwertsbreite der Filter beträgt etwa 5 nm. Mit einem Gerät dieses Typs wurden im Zeitraum von 1981 bis 1987 auch in Toronto systematisch spektrale UV-B-Globalstrahlungswerte aufgezeichnet. Eine streng quantitative Auswertung unter Anwendung der „Deconvolution“-Methode liegt nicht vor.

Meßvorhaben, bei denen Monochromatoren mit dispergierender Optik systematisch eingesetzt werden, sind meist nur auf einige Monate beschränkt. Häufiger werden auch UV-B-Spektralwerte im Rahmen von Sonnenenergie-Forschungsvorhaben mitgemessen, weil die kommerziellen modernen Spektralphotometer im allgemeinen eine kurzweilige Meßgrenze bei 300 nm oder tiefer aufweisen. Größere Verbreitung hat zum Beispiel das LICOR-Modell 1800 gefunden, doch sind die UV-B-Ergebnisse von geringer Genauigkeit. Genauere Resultate werden mit aufwendigeren Geräten wie zum Beispiel dem OL-Typ 742 erzielt.

Eine Ausnahme sind die systematischen Messungen der spektralen UV-B-Global-Bestrahlungsstärke zwischen 290 nm und 320 nm Wellenlänge, die etwa seit 1987 in Toronto und Edmonton (Kanada) mindestens zehnmal täglich automatisch aufgezeichnet werden. Als Meßgerät dient das wetterfeste Brewer Ozone Spectrophotometer, das in erster Linie zur Messung des atmosphärischen Ozongehalts eingesetzt wird. Die Halbwertsbreite des „scannenden“ Meßkanals beträgt etwa 0,7 nm.

In der Gruppe c) sind fast ausschließlich Meßgeräte der erythemwirksamen UV-Strahlung anzutreffen. Das Robertson-Berger UV-Meter ist in einem Meßnetz von etwa 14 Stationen verbreitet, das seinen Schwerpunkt in den USA hat, aber auch einige Stationen in Australien und in Europa (Davos, Belsk) aufweist. Das Management des Meßnetzes liegt in den Händen des Health Science Center der Temple University in Philadelphia.

Die spektrale Halbwertsbreite des relativ einfachen Geräts beträgt etwa 30 nm. Die entscheidende langweilige Flanke des Spektralfensters weicht von der Erythemschwellenwirkungsfunktion beträchtlich zur langwelligen Seite ab. Die Meßwerte werden in „Sunburn Units“ angegeben (vgl. Abbildung 2). Eine Reihe der Stationen sollte jetzt mehr als 14 Jahre lang Daten geliefert haben. Meßergebnisse wurden 1982 (19) und 1988 (20) zusammengestellt.

In Australien hat die CSIRO etwa von 1978 bis 1980 ein kleines Meßnetz von fünf Stationen mit selbstent-

wickelten Meßgeräten für die erythemwirksame Globalstrahlung betrieben. Es übertraf das Robertson-Berger-Gerät an apparativem Aufwand. Das Meßnetz wurde aufgelöst, da der Nachweis kleiner Langzeitänderungen der UV-B-Bestrahlungsstärke mit dem Meßgerät nicht möglich erschien.

Am Meteorologischen Observatorium Hamburg des Deutschen Wetterdienstes wurde in den siebziger Jahren auch ein Gerät zur Messung der erythemwirksamen Globalstrahlung entwickelt, das bezüglich der spektralen Anpassung an die Wirkungsfunktion (spektrale Halbwertsbreite etwa 6 nm), der Thermostatisierung und Cosinusfehler-Korrektur aufwendiger als das Robertson-Berger-Gerät gebaut ist. Nach einer Reihe von Verbesserungen im Laufe der Jahre sind jetzt sechs Meßgeräte im Einsatz, zwei am Meteorologischen Observatorium Hamburg und je eines am Meteorologischen Observatorium Hohenpeißenberg und an der Zentralen Medizin-Meteorologischen Forschungsstelle in Freiburg, sowie zwei als Expeditionsgeräte. Hauptziel der meist kontinuierlichen Messungen sind Verhältniswerte zur Globalstrahlung sowie die Abhängigkeit von Bewölkung und Neigungswinkel. Die Meßgenauigkeit der Sommerwerte liegt etwa bei 10 Prozent (zur feineren Kontrolle von Trends des atmosphärischen Ozongehalts ist eine Verbesserung der Kalibriereinrichtung notwendig und geplant (21)).

### 3. Forschungs- und Entwicklungsbedarf

Die bisher vorliegenden mehrjährigen UV-B-Meßergebnisse haben aus meßtechnischen Gründen Unsicherheiten und Instabilitäten, die 10 Prozent beziehungsweise 5 Prozent übersteigen und deshalb schwerlich geeignet sind, mit Ozonabnahme-Trends von etwa 0,15 Prozent je Jahr korreliert zu werden.

Da einerseits kein maßgeschneidertes UV-B-Meßgerät für genaue Trend-Beobachtungen zur Verfügung steht und andererseits Neuentwicklungen im allgemeinen mehr als fünf Jahre bis zur Einsatzreife benötigen, erscheint eine Weiterentwicklung (Verbesserung) bereits erfolgreich eingesetzter Meßgeräte (wie zum Beispiel des Brewer Ozone Spectrophotometers) naheliegend. Im Rahmen des Betriebs von Vielkanal-Meßsystemen ist der zusätzliche Einsatz von einem stabilen Einkanal-Empfänger aus Gründen der Kontrolle und Redundanz empfehlenswert. Wichtig erscheint auch, daß Labor-Kapazitäten bereitgestellt werden, um die spektralen Bandbreiten der Meßsysteme über mehrere Größenordnungen genau zu vermessen; dies ist die Voraussetzung für eine erfolgreiche Korrektur der gemessenen Spektralwerte (Deconvolution-Verfahren).

Differenzen zwischen UV-B-Meßwerten und Modellergebnissen können nicht nur durch Meßfehler, sondern auch durch unzureichende Kenntnis der Modellvariablen zustande kommen. Für genauere Berechnungen der Auswirkungen des Ozongehalts auf die UV-B-Intensität ist zum Beispiel das Höhenprofil der Ozonkonzentration erforderlich. Die Parameter zur Beschreibung der UV-B-Schwächung durch Bewölkung sind noch Gegenstand der Forschung und zur Zeit nicht mit ausreichender Genauigkeit verfügbar.



Im Hinblick auf die Korrelation der UV-B-Intensität mit dem atmosphärischen Ozongehalt sollten folgende Variablen gemessen werden:

- Ozongehalt in der Atmosphäre und seine Vertikalverteilung,
- Bewölkung (Gattung und Bedeckungsgrad),
- Globalstrahlung.

Zusätzlich sind Meßwerte der atmosphärischen Trübung (abgeleitet aus der spektralen direkten Sonnenstrahlung) und Werte der Bodenalbedo von Interesse.

Es sollte ein Meßnetz zur genauen Bestimmung des Trends der UV-B-Strahlung mit einer Zentrale eingerichtet werden, die die Kalibrierungen überwacht und organisiert. Gute strahlungsmeßtechnische Bedingungen für Feld- und Labor-Messungen, sowie die Nähe zu besonderen Kalibrierinstituten (möglicherweise: Synchrotron) sollten die Auswahlkriterien für den Standort einer solchen Zentrale sein.

Die Standorte der Meßstationen (Anzahl: etwa 3 bis 4) sollten folgende Bedingungen erfüllen:

- Meßstationen des Ozongehalts in der Atmosphäre und seiner Vertikalverteilung direkt oder im Umkreis von 100 km;
- Wolkenbeobachtungsstation im Umkreis von 10 km;
- freier Horizont (Störungen durch Erhebungen bis 5° zulässig);
- Geringe Luftverschmutzung.

Zu den Meßstationen sollten eine Nordseestation (zum Beispiel Norderney, Sylt) und eine süddeutsche Bergstation (zum Beispiel Zugspitze) sowie ein bis zwei Stationen in den dazwischenliegenden Breiten (etwa Meßstelle Deuselbach des Umweltbundesamtes, Meteorologisches Observatorium Hohenpeißenberg) gehören. Im Rahmen des Ozonforschungsprogramms des BMFT wird darüber hinaus die Etablierung eines UV-Meßgeräts an der Station Ny Klesund, Spitzbergen, empfohlen. Diese Station könnte in das internationale Meßnetz NDSC aufgenommen werden.

Zur Korrelation der Strahlungsdaten mit biologischen Wirkungen sind auch Meßstationen sinnvoll und notwendig, die kontinuierlich spektrale Meßwerte der solaren UV-Strahlung registrieren, zum Beispiel um Wirkungsfunktionen, die in Laborversuchen gefunden wurden, zu verifizieren. Die Wahl des Standorts dieser Stationen ist vorrangig unter dem Gesichtspunkt der Feststellung biologischer Auswirkungen zu treffen.

#### 4. Auswirkungen erhöhter UV-B-Strahlung

Bisher beruht die Annahme, daß sich die UV-B-Strahlung als Folge der Verminderung des Ozons in der Stratosphäre erhöht, auf den Kenntnissen über die Funktion des Ozons als physikalisch-chemischer Filter für UV-B-Strahlung. Experimentelle Untersuchungen über die Auswirkungen einer erhöhten UV-B-

Strahlung, die überwiegend unter Laborbedingungen durchgeführt wurden, lassen den Schluß zu, daß eine Erhöhung des gegenwärtigen natürlichen UV-B-Strahlungsflusses sowohl direkte als auch indirekte Auswirkungen auf den Menschen haben wird. Direkte Auswirkungen ultravioletter Strahlung, insbesondere ihres UV-B-Anteils, auf den menschlichen Organismus sind Hauterkrankungen, vor allem eine steigende Hautkrebsrate, sowie Schädigungen der Augen und des Immunsystems. Indirekte Konsequenzen wären eine reduzierte Biomasseproduktion mit Auswirkungen auf die Stabilität von Ökosystemen, auf die Nahrungskette und die Nahrungsmittelproduktion, sowie eine verminderte CO<sub>2</sub>-Fixierung durch aquatische und terrestrische Ökosysteme mit der Folge einer Verstärkung des Treibhauseffektes. Während aufgrund vorliegender Ergebnisse angenommen werden muß, daß die derzeit vorhandenen Schutz- und Reparaturmechanismen bei zahlreichen aquatischen und terrestrischen Lebewesen nicht ausreichen, um die negativen Folgen erhöhter UV-Strahlen abzuwenden, ist unklar, in welchem Umfang diese Lebewesen Strategien der Anpassung an zunehmende UV-B-Strahlung entwickeln können.

#### 4.1 Die Wirkung von UV-Strahlung auf biologische Systeme

Biologische Veränderungen verhalten sich im allgemeinen nicht direkt proportional zur Verringerung der Ozonschicht, sondern es müssen verstärkende Faktoren berücksichtigt werden. Die sogenannte „optische Verstärkung“ ergibt sich aus der Beziehung zwischen Ozonreduktion und der Erhöhung der biologisch wirksamen UV-B-Strahlung. Dieser optische Verstärkungsfaktor ist abhängig von der Wellenlänge und liegt im Wirkspektrum bei 300 nm, das heißt im UV-B-Bereich, etwa zwischen 1,7 und 2,0. Dies bedeutet, daß bei einer einprozentigen Abnahme der Ozonschicht die Strahlung in diesem Wellenlängenbereich um etwa 1,7 bis 2 Prozent zunimmt (22).

Bei bestimmten biologischen Wirkungen gibt es darüber hinaus noch einen zweiten Verstärkungseffekt. Dieser „biologische Verstärkungsfaktor“ ergibt sich aus der Beziehung zwischen der UV-Dosis und der biologischen Wirkung. Für das Beispiel der biologischen Auswirkung „Hautkrebs“ zeigen vergleichende Studien zwischen Bevölkerungen in verschiedenen geographischen Breiten, daß die Inzidenz von Hautkarzinomen in einer Population nicht direkt proportional zur effektiven UV-B-Strahlung verläuft, sondern erheblich stärker zunimmt (vgl. Nr. 4.3.3).

Die schädigende Wirkung von ultravioletter Strahlung auf lebende Systeme beruht auf der Absorption dieser kurzwelligen, energiereichen Strahlung durch Bausteine lebender Materie wie Nukleinsäuren, Struktur- und Enzymproteine, Pigmente und anderes und den aus dieser Wechselwirkung resultierenden Strukturveränderungen von Molekülen (Photoreaktion). Ein entscheidender Angriffspunkt für eine UV-bedingte Zellschädigung ist – wenn auch nicht ausschließlich – die DNA als Träger der genetischen Information (23).

Die relative biologische Wirksamkeit von UV-Strahlung ist abhängig von der Wellenlänge, die schädli-

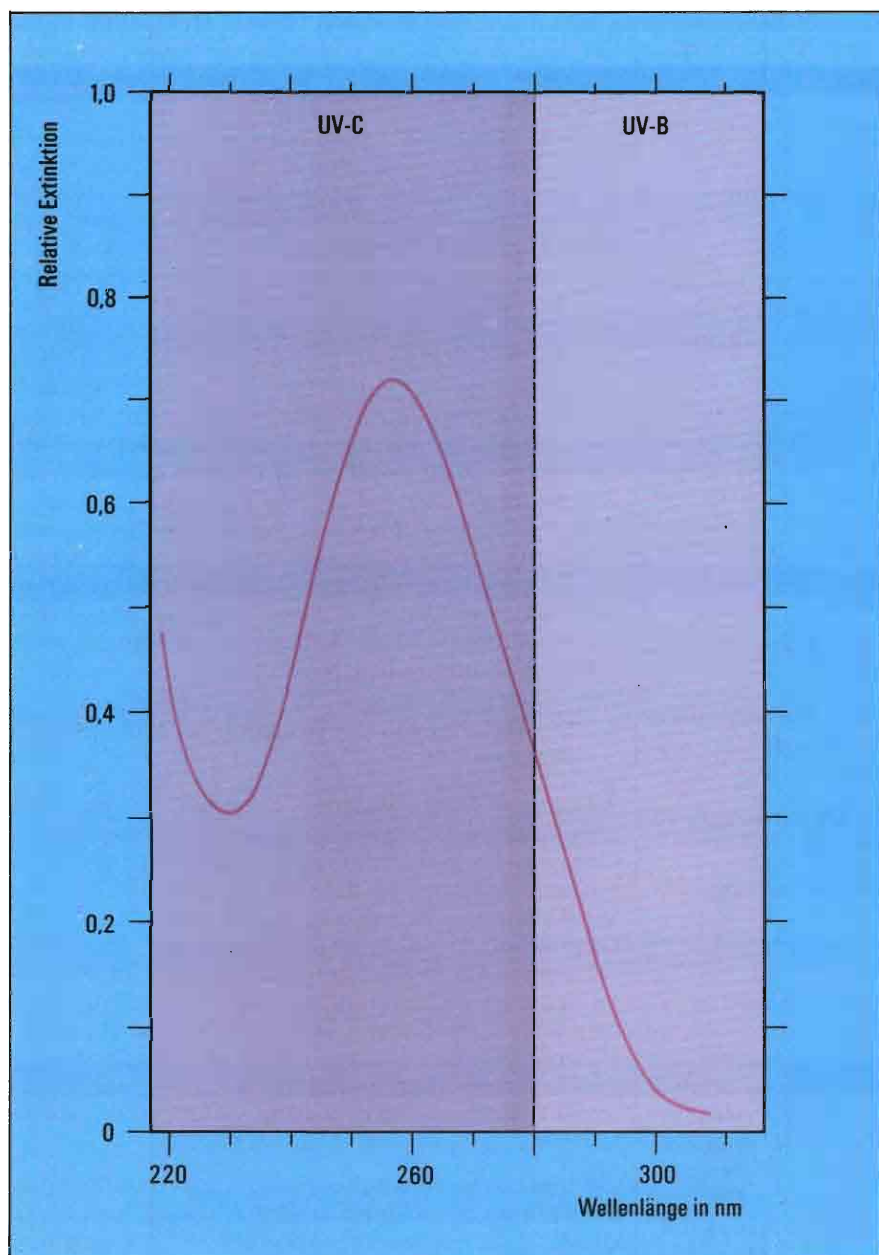


Abb. 5: Absorptionsspektrum der DNA (26).

gende Wirkung umso größer, je kürzer und damit energiereicher die Wellenlänge ist. Für den im Zusammenhang mit dem Ozonabbau in der Stratosphäre interessanten Wellenlängenbereich von 280 bis 320 nm heißt das: Die Schädigungswirkung der UV-Strahlung bei 300 nm Wellenlänge ist etwa tausendmal stärker als die bei 310 nm und ungefähr zehntausendmal stärker als die von 320 nm Wellenlänge (24). Für die biologische Wirkung von besonderer Bedeutung ist dabei das Absorptionsspektrum der DNA (vgl. Abbildung 5). Sie weist ein Absorptionsmaximum bei 260 nm auf und einen exponentiellen Abfall der Absorption im biologisch relevanten Bereich (290 bis größer 300 nm). Gerade im etwas größeren Wellenlängenbereich um 280 nm kommt es aber bei den Basen, die die Schlüsselbausteine der genetischen Substanz

darstellen, zu einer Strukturveränderung, der Bildung von sogenannten Dimeren. Diese Strukturveränderung ist ein wesentlicher Faktor für die biologische Wirksamkeit von UV-Strahlen (25).

Die DNA ist nicht der einzige mögliche Wirkungsort einer kurzwelligen UV-Strahlung. Von Bedeutung ist auch die Wechselwirkung, insbesondere Photoreaktionen, mit anderen Nucleinsäuren, Proteinen und Lipiden. Auch Zellmembranen können durch die photochemische Reaktion von Membranlipiden direkt durch UV-Strahlung geschädigt werden. Untersuchungen von Aktionspektren der UV-Strahlung bis in den sichtbaren Bereich hinein (größer 400 nm Wellenlänge) zeigten, daß Säugetierzellen oberhalb von 300 nm empfindlicher reagieren, als man allein auf-

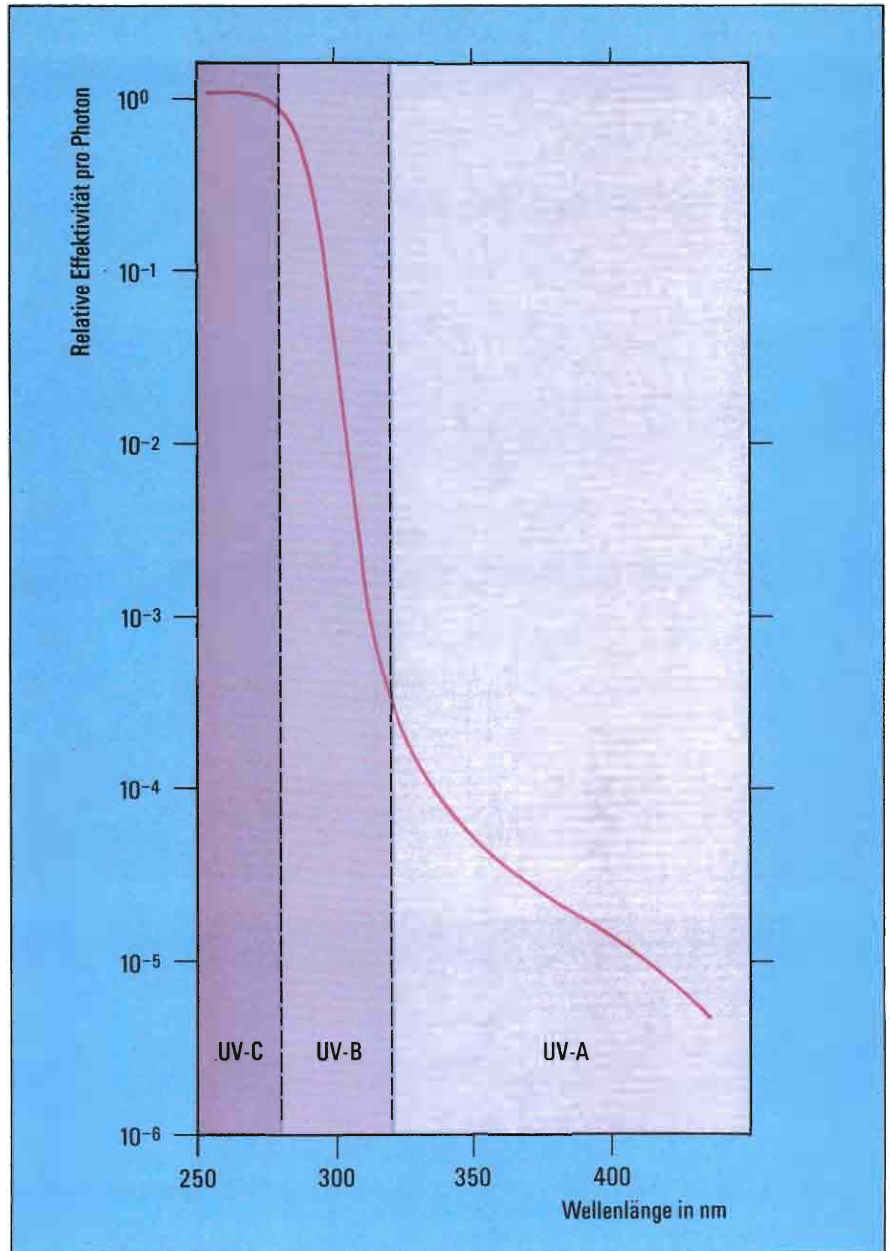


Abb. 6: Aktionsspektrum für die Inaktivierung menschlicher Hautzellen durch langwellige UV-Strahlung (27).

grund der DNA-Absorption erwarten würde (vgl. Abbildung 6). Die relative Empfindlichkeit der Säugerzellen liegt im oberen UV-B-Bereich und im UV-A-Bereich um mehrere Größenordnungen höher als die von Bakterien.

Die Empfindlichkeit aquatischer und terrestrischer Lebewesen gegenüber ultravioletter Strahlung ist sehr unterschiedlich. Sie hängt einerseits ab von der unterschiedlich ausgeprägten Fähigkeit strahleninduzierte Schädigungen, vor allem der DNA, dem Träger der Erbinformation und von Membranen zu reparieren oder zu kompensieren, andererseits von dem Ausmaß der Ausbildung von Schutzmechanismen, wie zum Beispiel Schutzpigmenten.

#### 4.2 Gegenwärtige und zukünftige Veränderungen der biologisch effektiven UV-Strahlung

Unabhängig davon, daß bisher flächendeckende UV-B-Messungen in Bodennähe fehlen, wurden anhand der vorliegenden TOMS-Daten (Total Ozone Mapping-Spektrometer) zum Ozonabbau und anhand von Szenarien eines zukünftig zu erwartenden weiteren Ozonabbaus Rechenmodelle erstellt, die sowohl die mögliche Verschiebung des Solarspektrums in den kurzwelligeren Bereich als auch die verschiedenen Aktionsspektren von drei für die Wertung der biologischen Wirksamkeit wichtigen Parametern mit einbeziehen:

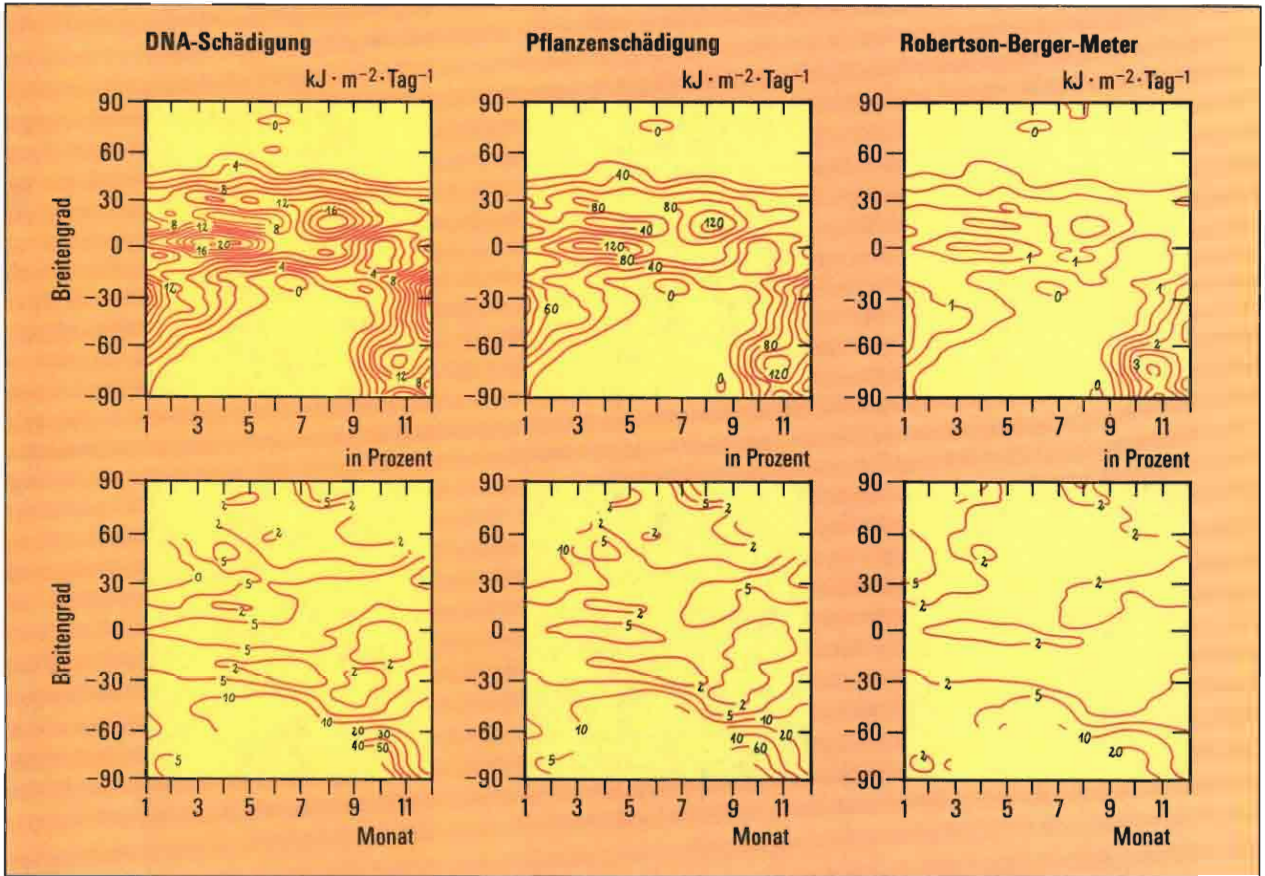


Abb. 7: Berechneter Anstieg der effektiven UV-B-Strahlung für den Zeitraum 1979/1980 bis 1987/1988 aufgrund der Daten für den Ozonabbau in der Stratosphäre nach TOMS. Die Berechnung wurde für die drei Aktionsspektren der Parameter „DNA-Schädigung“, „Pflanzenschädigung“ und „Messungen mit dem Robertson-Berger-Meter“ durchgeführt (28).

- Die Schädigung der DNA
- die Schädigung von Pflanzen und
- die für Sonnenbrand wirksame UV-Dosis, grob geschätzt mit dem Robertson-Berger-Meter, einem Meßgerät, mit dem die für die Entstehung von Sonnenbrand wirksamen UV-Dosen aufgezeichnet werden.

Die Berechnungen wurden jeweils für die einzelnen Breitengrade im Jahresverlauf dargestellt. Abbildung 7 stellt die Berechnung des Anstiegs der effektiven UV-B-Strahlung im Zeitraum 1979/1980 bis 1987/1988 auf der Grundlage der TOMS-Daten dar. Während Veränderungen in den mittleren Breiten der südlichen Hemisphäre im äquatorialen Bereich und auf der Nordhalbkugel überwiegend im Bereich zwischen zwei und fünf Prozent liegen, wurde für den Bereich des sechzigsten bis neunzigsten Grades südlicher Breite eine Erhöhung der effektiven UV-B-Strahlung für die DNA-Schädigung von bis zu 50 Prozent, der von Pflanzen bis maximal 60 Prozent und der für den Sonnenbrand (Hauterytheme) verantwortlichen UV-B-Strahlung bis zu 20 Prozent für die Monate September bis November berechnet.

### 4.3 Direkte Auswirkungen auf den Menschen

UV-B-Strahlung in geringen Dosen hat positive Effekte auf den menschlichen Organismus. So kann die Haut das lebenswichtige Vitamin D nur unter Einwirkung von UV-Strahlung aus den mit der Nahrung aufgenommenen Vorstufen bilden. Dabei ist aber bereits eine geringe UV-Dosis ausreichend. Ebenso wird in der Medizin UV-B-Strahlung zur Behandlung bestimmter Hautkrankheiten wie der Psoriasis eingesetzt.

Gleichzeitig aber wirkt sich ultraviolette Strahlung schädigend auf den menschlichen Organismus und seine Funktionen aus. Der Grad der Schädigung ist dabei abhängig von der Dosis. Schädigungen betreffen vor allem

- das Auge,
- die Haut sowie
- das Immunsystem.

Die bisherigen qualitativen und quantitativen Erkenntnisse zu dem Einfluß einer erhöhten UV-B-Strahlung auf den menschlichen oder tierischen Orga-

nismus beruhen auf tierexperimentellen Daten und epidemiologischen Vergleichsstudien zwischen Personengruppen, die wegen ihres Lebensraumes oder ihrer Lebensweise verschieden hoher UV-Exposition ausgesetzt waren. Anhand dieser Daten wurden bereits quantitative Abschätzungen der zu erwartenden Auswirkungen bei einer Ozonabnahme respektive Zunahme der UV-B-Strahlung durchgeführt, die aber noch relativ unsicher sind. Dafür liegen mehrere Gründe vor:

- Die Dosis-Wirkungskurve der UV-B-Strahlung ist in Teilbereichen nicht-linear.
- Die UV-Sensibilität hängt ab von der Hautpigmentierung (erblich bedingt oder durch Sonneneinstrahlung erworben), Verhornung der oberen Hautschicht oder krankheitsbedingten Veränderungen der Haut.
- Die Menschen in den Industrieländern zeigen in den letzten Jahrzehnten ein verändertes Freizeitverhalten, das auch unabhängig von einem höheren UV-B-Anteil des solaren Strahlungsflusses zu einer erhöhten UV-B-Exposition führt (häufiges Sonnenbaden, Urlaub in südlichen Ländern, Solarien).

Generell muß unterschieden werden zwischen akuten Schäden, die als direkte Folge einer einmaligen überhöhten Strahlungs-dosis auftreten, und Langzeiteffekten, die erst als Folge kumulativer UV-Exposition über Jahre oder Jahrzehnte hinweg auftreten.

#### 4.3.1 Augenerkrankungen

Häufige oder erhöhte UV-B-Exposition kann bereits bei der derzeitigen Intensität der UV-B-Strahlung zu Schädigungen des Auges führen. Als akute Schädigung der Hornhaut, die bei besonders exponierten Personen (Skifahrern) auftritt, ist die sogenannte Schneeblindheit bekannt. Sie tritt nach einmaliger oder wiederholter überhöhter UV-Exposition auf und klingt gewöhnlich innerhalb einiger Tage ab. Im Gegensatz zum Hautepithel kann das Hornhautepithel keinen Sonnenschutz aufbauen. Während Wellenlängen von weniger als 290 nm vor allem das Hornhautepithel schädigen, werden bei Wellenlängen zwischen 290 und 315 nm auch tieferliegende Hornhautschichten geschädigt (29).

Ein Langzeiteffekt von UV-B-Strahlung ist die Entstehung verschiedener Formen der Katarakt, einer im Alter auftretenden bleibenden Trübung der Augenlinse. Neben einer kumulativen UV-B-Bestrahlung werden hierfür auch der UV-A-Anteil des Sonnenlichtes und andere Gründe, wie Mangelernährung, verantwortlich gemacht. Die steigende Lebenserwartung erhöht die Zahl der Fälle von Blindheit infolge von Katarakten sowohl in Entwicklungs- als auch in Industrieländern. Es wird erwartet, daß das Auftreten von Katarakt zu einem zunehmenden Problem in Entwicklungsländern werden wird. Es ist davon auszugehen, daß bereits im Jahr 2000 zwei Drittel der Bevölkerungsgruppe der Älteren, bei der dieses Krankheitsbild zur Ausprägung kommt, in den Entwicklungsländern lebt (30). Gerade dort, in Gebieten mit ohnehin

schon erhöhter UV-Einstrahlung, sind entsprechende medizinische Behandlungsmöglichkeiten nur im geringen Umfang vorhanden.

Neuere epidemiologische Studien weisen einen direkten Zusammenhang zwischen der durchschnittlichen jährlichen UV-B-Exposition und der Entstehung bestimmter Kataraktformen nach (31; 32). Die Umweltschutzbehörde der Vereinigten Staaten (United States Environmental Protection Agency, US-EPA) schätzt, daß jedes Prozent Ozonabnahme in der Stratosphäre einen Anstieg der Fälle von Katarakt zwischen 0,3 und 0,6 Prozent nach sich zieht. Auf der Grundlage solcher Studien wird geschätzt, daß die gegenwärtige Anzahl der Fälle von Kataraktblindheit von 17 Millionen bei einer einprozentigen Reduktion der Ozonschicht in der Stratosphäre um 100 000 bis 150 000 steigen würde (33).

#### 4.3.2 Immunsystem

Zu starke UV-Bestrahlung hat Auswirkungen auf das Immunsystem, insbesondere das der Haut. UV-Strahlung schwächt die Reaktion der zellulären Immunabwehr gegenüber Krankheitserregern. In Tierversuchen konnte nachgewiesen werden, daß die Bildung der Zellen des Immunsystems, die für die Auslösung der Immunabwehr verantwortlich sind, durch Bestrahlung mit UV-Licht unterdrückt wird (34; 35; 36).

Es wird befürchtet, daß eine erhöhte UV-B-Strahlung durch Viren, Bakterien und andere Parasiten hervorgerufene Infektionskrankheiten begünstigt. Die Annahme, daß einige tropische Infektionskrankheiten begünstigt werden könnten, ist allerdings bisher nicht epidemiologisch untermauert, sondern beruht auf tierexperimentellen Daten, die den Schluß zulassen, daß eine UV-B bedingte allgemeine Schwächung der Immunabwehr und der Rekonvaleszenz des menschlichen Organismus die Ausbreitung dieser Krankheiten weiter begünstigen könnten (37). Berücksichtigt werden muß dabei auch, daß gegenwärtig zur Ausbreitung derartiger Krankheiten in den Tropen andere Faktoren beitragen.

#### 4.3.3 Haut

Selbst bei bestehenden Strahlungsintensitäten ist die UV-B-Strahlung bereits für zahlreiche Hautkrebs-erkrankungen verantwortlich. Dies wird dadurch belegt, daß vergleichbare Bevölkerungsgruppen dann eine höhere Häufigkeit von Hautkrebs zeigen, wenn sie in verstärktem Maße dem Sonnenlicht ausgesetzt sind. Die Medizin unterscheidet zwei Gruppen von Hautkarzinomen und ihren Vorstufen:

- die Basalzell- und Plattenepithelkarzinome, die kanzerogene Veränderungen der Epidermiszellen der Haut darstellen, sowie
- maligne Melanome, das heißt bösartige Tumore der Pigmentzellen der Haut und ihre Vorstufen (melanotische Präkanzerosen: Lentigo maligna).

Basalzell- und Plattenepithelkarzinome, die auch unter der Sammelbezeichnung „non melanoma skin

cancer“ zusammengefaßt werden (als Gegensatz zu den Melanomen: melanoma scin cancer) stellen die bei weitem häufigsten Formen des Hautkrebses dar, verlaufen aber weniger häufig tödlich als Melanome.

Das Risiko einer Hautkrebserkrankung wird von mehreren Faktoren beeinflusst. Dazu zählen die Hautfarbe, die gesamte, im Verlauf des Lebens erhaltene Dosis von UV-Strahlung sowie die überstarke UV-Exposition in der Jugend, die häufig zu schweren Sonnenbränden führt (38; 39).

Menschen mit heller Hautfarbe haben ein ungleich höheres Risiko, an Hautkrebs zu erkranken, als Menschen mit dunkler Hautfarbe. Eine Vergleichsstudie aus den USA zeigte, daß die Wahrscheinlichkeit für einen farbigen Amerikaner, an einem Melanom beziehungsweise einem Nicht-Melanom-Hautkrebs zu erkranken, nur zehn beziehungsweise ein Prozent des Risikos eines weißen Amerikaners beträgt (40). Vergleichbare Befunde liegen aus Südafrika sowie aus Australien vor, wo die Hautkrebsrate von Einwohnern europäischer Abstammung erheblich höher liegt, als die der Ureinwohner (41).

Für Plattenepithelkarzinome konnte nachgewiesen werden, daß das Risiko einer Erkrankung entsprechend der Summe der im Verlauf des Lebens erhaltenen Sonnenbestrahlung steigt. Hauptverantwortlich für den Prozeß der Krebsentstehung ist dabei der UV-B-Anteil des Sonnenlichtes. Untersuchungen an Mäusen zeigten, daß gerade Strahlung des Wellenlängenbereichs um 300 nm, deren Zunahme infolge des Ozonabbaus in der Stratosphäre zu befürchten ist, hinsichtlich der Auslösung von Plattenepithelkarzinomen am wirksamsten ist (42; 43). Ein Vergleich von Bevölkerungsgruppen in verschiedenen geographischen Breiten zeigte, daß durch den biologischen Verstärkungsfaktor eine einprozentige Erhöhung der effektiven UV-B-Strahlung die Krebsrate um 2,9 Prozent erhöht. Zusammen mit dem optischen Verstärkungsfaktor zwischen Ozonabbau und UV-B-Intensität bedeutet dies eine Zunahme der Rate von Plattenepithelkarzinomen um 4,6 Prozent bei einer einprozentigen Reduktion der Ozonschicht in der Stratosphäre (44). Für Basalzellkarzinome beträgt dieser Wert 2,7 Prozent. Rechnet man das Verhältnis der Häufigkeit von Basalzell- und Plattenepithelkarzinomen mit ein, ist davon auszugehen, daß eine einprozentige Ozonabnahme in der Stratosphäre letztendlich eine dreiprozentige Erhöhung der Hautkrebserkrankungen ohne Melanome zur Folge hat. Unter Berücksichtigung der beiden beschriebenen Verstärkungsfaktoren wurde für eine fünfprozentige Abnahme der Ozonschicht ein langfristiger Anstieg der Basalzellkarzinome um 14 Prozent und der Plattenepithelkarzinome um 25 Prozent berechnet. Dies würde beispielsweise für die USA eine Erhöhung der gegenwärtigen jährlichen Neuerkrankungen mit Hautkarzinomen von 500 000 um weitere 81 000 bedeuten. Weltweit wird mit 240 000 zusätzlichen Erkrankungen (ohne Melanome) gerechnet (45).

Von besonderer Bedeutung ist die Frage des Zusammenhangs zwischen dem Auftreten von Melanomen und einer erhöhten UV-B-Strahlung. Wenngleich Melanome weniger häufig sind als die bisher dargestell-

ten Hautkrebsarten, sind sie ungleich gefährlicher und verlaufen wesentlich häufiger tödlich. Nach einer Studie der US-EPA gibt es zahlreiche Hinweise, die einen direkten Zusammenhang zwischen UV-B-Strahlung und der Entstehung von Melanomen belegen:

- In Ländern mit hoher Sonneneinstrahlung, zum Beispiel Australien, ist die Melanomrate bei Einwohnern europäischen Ursprungs deutlich größer als bei dunkelhäutigen Ureinwohnern;
- Menschen mit geringer Hautpigmentierung als Schutz vor Sonneneinstrahlung haben höhere Melanomraten.;
- Menschen mit der erblichen Hauterkrankung „Xeroderma pigmentosum“ erkranken wesentlich häufiger an Hautkrebs, insbesondere an Melanomen, als andere Menschen; bei dieser Krankheit ist der Reperaturmechanismus gestört, der in normalen und gesunden Zellen durch UV-B-Einwirkung an der DNA entstehende Schäden repariert;
- epidemiologische Daten belegen, daß Melanomraten in niedrigen Breiten und daher bei erhöhten Strahlungsdosen deutlich höher liegen;
- Fallstudien zeigten, daß ein Zusammenhang besteht zwischen überstarker UV-Exposition und schweren Sonnenbränden in der Jugend auf der einen und dem Risiko, an Melanomen zu erkranken, auf der anderen Seite.

Aufgrund dieser Befunde und einer Neubewertung älterer Literaturdaten schätzt die US-EPA mittlerweile, daß eine einprozentige Ozonabnahme in der Stratosphäre zu einem zweiprozentigen Anstieg der Melanomhäufigkeit führen würde (46). Darüber hinaus werden aus dem Bereich der medizinischen Forschung in den nächsten Jahren Daten zu den bisher fehlenden Dosis-Wirkungsabschätzungen erwartet (47).

Die Häufigkeit von Hautkrebserkrankungen, insbesondere malignen Melanomen, hat bei der weißen Bevölkerung weltweit in alarmierendem Maße zugenommen. Die Vereinigten Staaten verzeichneten zwischen 1974 und 1986 einen jährlichen Anstieg der Melanomrate von drei bis vier Prozent (48). Australien hat die weltweit höchste Rate an Hautkarzinomen. Zwei von drei Australiern, so wird geschätzt, weisen im Verlauf ihres Lebens zumindest einmal kanzerogene Hautveränderungen (ohne Melanome) auf (49). Die Melanom mortalität stieg zwischen den Jahren 1930 und 1987 jährlich um 22 beziehungsweise 17 Prozent bei männlichen beziehungsweise weiblichen Australiern europäischer Herkunft. Gegenwärtig steigt die Rate der Melanomerkkrankungen um 6,5 beziehungsweise 4,4 Prozent pro Jahr.

Die gegenwärtige Situation in Australien ist zwar nicht auf eine anthropogene Erhöhung des UV-B-Anteils im Sonnenlicht zurückzuführen, sondern ergibt sich aus der ohnehin starken Sonneneinstrahlung und einer erhöhten Sonnenexposition der Bevölkerung infolge geänderten Freizeitverhaltens. Dennoch kann Australien als Modell für eine mögliche zukünftige Entwicklung in anderen Teilen der Erde betrachtet werden (50).

#### 4.4 Auswirkungen auf terrestrische Ökosysteme

Die schädigende Wirkung erhöhter UV-Strahlung auf einzelne Komponenten terrestrischer Ökosysteme konnte in zahlreichen Untersuchungen nachgewiesen werden. So beeinträchtigt erhöhte UV-Strahlung Wachstum, Stoffwechsel und Blühverhalten von Landpflanzen sowie mikrobielle Prozesse im oberen Bodenhorizont. Es wird deshalb angenommen, daß erhöhte UV-Strahlung die Stabilität und die Zusammensetzung terrestrischer Ökosysteme verändert. Die verfügbaren Daten reichen allerdings nicht aus, um den Umfang der zu erwartenden Folgen für land- und forstwirtschaftliche Erträge, Boden- und Wasserhaushalt sowie die daraus resultierenden sozio-ökonomischen Konsequenzen abschätzen zu können.

Experimentelle Untersuchungen zu den Folgen erhöhter UV-Strahlung für terrestrische Ökosysteme haben sich bislang weitgehend auf die Erfassung der Wirkung zusätzlicher UV-Strahlen auf die Landpflanzen konzentriert. Aufgrund des abweichenden Emissions-Spektrums künstlicher UV-B-Quellen sind die Ergebnisse solcher Versuche jedoch nur von begrenzter Aussagekraft. In neueren Arbeiten konnte eine geeignete Simulation erhöhter UV-B-Einstrahlung dadurch erreicht werden, daß Pflanzen in Kulturschranken an einem geographisch südlicher gelegenen Standort mit natürlicherweise erhöhter UV-B-Belastung angezogen wurden. Der Einsatz einer UV-durchlässigen Plexigasküvette, die mit Ozon durchströmt wird, erlaubt dabei eine Reduktion der aktuellen Strahlung des südlichen Standorts als Kontrolle. Ein vielversprechender experimenteller Ansatz, der bisher noch nicht realisiert wurde, ist die Exposition von Ökosystemausschnitten in Gewächshäusern auf verschiedenen Höhenstufen. Auf diese Weise könnten eine erhöhte UV-B-Einstrahlung simuliert und die Folgen für verschiedene Ökosysteme und ihre Komponenten (etwa Pflanze/Boden) und deren Wechselwirkungen in Kurz- und Langzeitversuchen analysiert werden. In den bisher vorliegenden Arbeiten wurden lediglich einzelne Ökosystemkomponenten (z. B. eine Pflanze oder ein Bodenmikroorganismus) untersucht; damit können aber nur begrenzt Rückschlüsse auf die Folgen erhöhter UV-Strahlung für terrestrische Ökosysteme gezogen werden.

##### 4.4.1 Experimentelle Beobachtungen bei Landpflanzen

Die Sensibilität gegenüber UV-Strahlung ist von den einzelnen Pflanzenarten und Kulturvarietäten einer Art abhängig. Von den mehr als 200 Pflanzenarten und Varietäten, die bisher auf ihre UV-Sensitivität (in Gewächshäusern oder im Freiland) untersucht wurden, wurde mehr als die Hälfte als UV-sensitiv klassifiziert. Darunter befinden sich zahlreiche sensitive Varietäten landwirtschaftlicher Kulturpflanzen wie Sojabohnen, Gurken, Erbsen, Bohnen, Sonnenblumen und verschiedene Getreidesorten. Von 25 Sojabohnensorten reagierten zwei Drittel sensitiv (51). Es wird deshalb davon ausgegangen, daß die Höhe der natürlichen UV-Strahlung neben Temperatur, Tageslänge und Niederschlag die Verbreitungsgebiete von

Pflanzenarten beziehungsweise ihren Varietäten bestimmt. Pflanzen haben sich allem Anschein nach im Laufe der Evolution an die am Standort herrschende UV-Strahlung adaptiert. Welche Ursachen die unterschiedliche Empfindlichkeit verschiedener Pflanzenarten und Varietäten hat, ist bisher nicht eindeutig geklärt; welche Mechanismen eine Adaptation an erhöhte UV-Strahlung ermöglichen, ist unbekannt.

Als Folgen erhöhter UV-Strahlung wurde in Versuchen mit künstlicher Bestrahlung und mit reiner Sonneneinstrahlung ein reduziertes Blatt- und Sproßwachstum festgestellt (52). In Arbeiten mit artifizieller UV-Strahlung konnten ferner eine erniedrigte Photosyntheseaktivität und ein verringertes Trockengewicht festgestellt werden. Bei einer Sojabohnensorte wurde unter dem Einfluß einer UV-B-Strahlung, die einer Ozonverringerung um 25 Prozent entsprach, eine Ertragsminderung von 25 Prozent nachgewiesen. Bei gemeinsamer Kultur von Weizen (*Triticum aestivum*) und Wildhafer (*Avena fatua*) verschiebt sich das kompetitive Gleichgewicht zu Gunsten des Weizens. Als Ursache dafür wird die stärkere Beeinträchtigung des Wachstums beim Wildhafer gesehen. Ein derart verändertes Konkurrenzverhalten zwischen Pflanzen eines Standortes könnte auf die Dauer auch natürliche Ökosysteme beeinflussen und damit die Artenzusammensetzung langfristig verändern (53; 54).

Mehrjährige Pflanzen, insbesondere Bäume, die eine große Zahl von Vegetationsperioden überdauern, sind einer kumulativen UV-Exposition über Jahre oder Jahrzehnte ausgesetzt. Über die Wirksamkeit einer solchen kumulativen Exposition und ihrer Konsequenzen für die Entwicklung von Schutzmechanismen liegen bisher keine Ergebnisse vor. Bäumen sollte aber in diesem Zusammenhang besondere Aufmerksamkeit gewidmet werden, da sie einerseits wesentlichen Anteil an der photosynthetischen CO<sub>2</sub>-Fixierung haben und einen wichtigen Kohlenstoffspeicher darstellen, andererseits geringe Änderungen in der Photosyntheserate wegen des hohen Anteils respiratorischen, nicht-photosynthetisch aktiven Gewebes erhebliche Auswirkungen auf die Nettoprimärproduktion haben können. In Untersuchungen an Keimlingen einiger Nadelbaumarten (*Pinus contorta*, *Pinus resinosa* und *Pinus taeda*) konnte gezeigt werden, daß zusätzliche UV-Strahlung das Wachstum und die Biomasseproduktion reduziert. Vorläufige Ergebnisse mehrjähriger Feldversuche an sieben verschiedenen Kultursorten von *Pinus taeda* zeigten, daß die Simulation einer Ozonreduktion um 16 Prozent bei zwei Kultursorten, um 25 Prozent sogar bei sechs Kultursorten zu einer Reduktion der Biomasse führte. Damit konnte eine deutliche Dosis-Wirkungs-Beziehung zwischen UV-Strahlung und Pflanzenwachstum dargestellt werden (55).

##### 4.4.2 Schädigungsmechanismen

Die äußerlich sichtbaren Reaktionen auf erhöhte UV-B-Strahlung (zum Beispiel Reduktion von Blattfläche, Sproßlänge, Ertrag) beruhen auf Änderungen physiologischer Prozesse, die ihrerseits auf molekulare Veränderungen der primären Angriffsorte („Targets“) zurückzuführen sind. Nur wenige dieser Targets konn-

ten bisher in Pflanzen und Bodenmikroorganismen zweifelsfrei identifiziert werden. So werden das Schlüsselenzym der biologischen Stickstofffixierung, die Nitrogenase, und das Schlüsselenzym der chemolithotrophen Nitrifikation, die Ammoniummonoxygenase, durch Licht aktiviert, jedoch durch UV-B-Strahlung inaktiviert (vgl. Nr. 4.4.2 und 4.5.1). An Sonnenblumenkeimlingen konnte ein photooxidativer Abbau des pflanzlichen Wachstumshormons Indolelessigsäure nachgewiesen werden (56). Versuche mit isolierten Chloroplasten zeigten, daß die Reaktionszentren von Photosystem II durch UV-B-Strahlung inaktiviert werden (57). Die Bedeutung anderer primärer Angriffsorte bei Pflanzen und Mikroorganismen, zum Beispiel Nukleinsäuren, Membranbestandteilen und anderem, sowie die physiologischen Konsequenzen der Schädigung der oben genannten Angriffsorte sind kaum untersucht. Nur in wenigen Arbeiten wurden Hinweise auf kausale Zusammenhänge gefunden. Für den photooxidativen Abbau der Indolelessigsäure durch UV-Bestrahlung konnte bei Sonnenblumenkeimlingen gezeigt werden, daß es zu einer Hemmung des Hypokotylwachstums kommt. An Zellkulturen wurde nachgewiesen, daß UV-Bestrahlung nur bei Anwesenheit von Sauerstoff die Durchlässigkeit von Membranen verändert (58). Ferner wurde eine Stimulierung der Bildung toxischer Sauerstoffverbindungen (zum Beispiel  $H_2O_2$ ) bei UV-Bestrahlung beobachtet (59). Diese Ergebnisse weisen auf eine Schädigung von Membranen durch UV-Bestrahlung hin. Welche Ursachen die an Gurkenkeimlingen nachgewiesene UV-Bedingte Störung des Schließmechanismus der Spaltöffnung hat (60), ist unbekannt. Die Schädigungsmechanismen von UV-B-Strahlung in Pflanzen und Bodenmikroorganismen müssen deshalb als weitgehend unerforscht angesehen werden.

#### 4.4.3 Schutzmechanismen

Zahlreiche Pflanzenarten und Kulturvarietäten schirmen ihren Photosyntheseapparat und die übrigen Zellbestandteile durch Bildung von Schutzpigmenten in den äußeren Zellschichten, vor allem in der Epidermis, ab. Dazu zählen in erster Linie die Flavonoide, Derivate des Phenylpropan, die unter Einwirkung von UV-B-Strahlung akkumuliert werden (61). Die Beobachtung, daß unter dem Einfluß von UV-B-Strahlung toxische Sauerstoffverbindungen vermehrt gebildet (vgl. Nr. 4.4.3), aber auch entgiftende Enzyme induziert werden können, legt die Vermutung nahe, daß auch antioxidative Systeme als Schutz- und/oder Reparaturmechanismen für UV-B-Strahlung anzusehen sind (62). Eine reduzierte UV-B-Sensibilität bei erhöhten Konzentrationen des Antioxidanz Glutathion unterstützt diese Annahme (63). Antioxidative Systeme dürften vor allem als Schutz- und Reparaturmechanismen bei Membranschädigung eine Rolle spielen. Ein weiterer Schutzmechanismus ist die Fähigkeit der Pflanzen, UV-Schäden an der DNA durch die Bildung eines Enzyms, der Photolyase, zu reparieren. Die Synthese dieses Enzyms wird durch Licht induziert. Es wird vermutet, daß UV-empfindliche Pflanzen die Photolyase nicht oder nur in ungenügendem Umfang synthetisieren können.

#### 4.4.4 Bodenmikroorganismen und Stickstoffversorgung

Landpflanzen können molekularen Stickstoff, der zum Aufbau der Biomasse notwendig ist, nicht wie zum Beispiel das ebenfalls notwendige Kohlendioxid direkt aus der Luft aufnehmen. Eine entscheidende Rolle bei der Stickstoffversorgung höherer Pflanzen (etwa Soja) spielen Symbionten, wie die Knöllchenbakterien der Leguminosen, oder Cyanobakterien (Blualgen) in den tropischen Reisfeldern. Sie fixieren atmosphärischen Stickstoff und machen ihn den Pflanzen verfügbar (vgl. Nr. 4.5). Cyanobakterien werden ebenso wie das Meeresplankton signifikant durch UV-B-Strahlung geschädigt. Ihnen kommt vor allem Bedeutung bei der Stickstoffversorgung im extensiven, beziehungsweise ökologischen Reisanbau zu, wogegen ihre Funktion beim Anbau von Hochertragssorten weitgehend durch mineralischen Stickstoffdünger ersetzt ist. Unter optimalen Bedingungen kann die Stickstofffixierung durch Cyanobakterien 60 bis 100 kg pro Hektar und Jahr betragen. Über den Einfluß erhöhter UV-Strahlung auf die Mikroorganismenpopulation des oberen Bodenhorizonts und deren Dynamik liegen nur wenige Untersuchungen vor. UV-Bestrahlung von Nitrosomonas-Zellen führt zu einer Hemmung der Ammonium-Oxidation. Ursache dieser Hemmung scheint eine Inaktivierung der Ammonium-Monoxygenase durch UV-Strahlen zu sein (64; 65). In Freilandversuchen konnte zudem gezeigt werden, daß eine Filterung des UV-Anteils des Sonnenlichts zu einer signifikanten Erhöhung der Zahl chemolithotropher Ammonium-Oxidierer in den oberen Bodenschichten (bis 0,5 cm Tiefe) führt (66). Da nach neueren Arbeiten eine Ammonium-Monoxygenase auch an den heterotrophen Nitrifikationsprozessen in den oberen Bodenschichten beteiligt ist, muß angenommen werden, daß erhöhte UV-B-Strahlung massiv Einfluß auf die Ammonium-Umsetzung und damit auf den Stickstoff-Kreislauf in Böden nimmt. In welchem Umfang auch epiphytische Mikroorganismen durch erhöhte UV-Strahlung beeinträchtigt werden, ist unbekannt.

#### 4.4.5 Einfluß von UV-B-Strahlung in Kombination mit anderen Streßfaktoren

Im Hinblick auf befürchtete Klimaänderungen erhebt sich die Frage, welche Auswirkungen eine Erhöhung der UV-B-Strahlung in Kombination mit der Änderung anderer, für Pflanzen wichtiger Parameter — zum Beispiel der Kohlendioxidkonzentration in der Atmosphäre — hat und welche Rückkopplungsvorgänge für die Atmosphäre sich daraus ergeben. Über Kombinationswirkungen liegen lediglich Arbeiten zum Einfluß von Wassermangel und UV-B-Strahlung auf Pflanzen vor. Dabei zeigte sich, daß Wassermangeleffekte mögliche UV-B-Effekte maskieren können. So konnte nachgewiesen werden, daß eine Sojabohnensorte bei Erhöhung der UV-B-Strahlung entsprechend einem 25 prozentigen Ozonabbau unter ansonsten optimalen Wuchsbedingungen mit einer deutlichen Reduktion von Wachstum und Photosynthese reagiert. Setzt man die Pflanzen zudem einem Wassermangel aus, verhält sich dieser hierzu nicht additiv,



sondern bewirkt selbst bereits eine so starke Reduktion von Wachstum und Photosynthese, daß der durch UV-B-Strahlung bedingte Effekt nicht weiter erhöht wird. Anscheinend wird unter Wassermangel die Ausbildung von Pigmenten gefördert, die für UV-Strahlung eine Schutzfunktion ausüben können. Ein direkter Zusammenhang zwischen Wassermangel, Pigmentbildung und Schutzfunktion ist bisher jedoch nicht belegt (67).

Über Kombinationswirkungen zwischen einer Erhöhung der Parameter UV-B-Strahlung, Kohlendioxidkonzentration in der Atmosphäre und Temperatur liegen bisher keine Untersuchungen vor. Die Temperatur könnte insbesondere in den Tropen aber von Bedeutung werden, da hier viele Pflanzen bereits an ihrem oberen Optimum arbeiten. Eine Überschreitung dieses Optimalwerts würde eine verringerte Photosyntheseleistung nach sich ziehen, was in Kombination mit erhöhter UV-B-Strahlung zu erheblichen Einbußen an Biomasse und eventuell an Ertrag führen könnte. Der sogenannte CO<sub>2</sub>-Düngungseffekt könnte zwar theoretisch kompensatorisch wirken, ist jedoch nicht bei allen Pflanzengruppen wirksam und nicht für pflanzliche Ökosysteme insgesamt belegt (vgl. Abschnitt C, 3. Kapitel).

Ebenfalls noch offen ist die Frage, welche Folgen das bei erhöhter UV-B-Strahlung veränderte Blühverhalten einiger Pflanzen für die Bestäubung durch Insekten haben könnte. Ein weiterer Aspekt möglicher bio-

logischer Interaktionen ist die unter Einfluß von UV-B-Strahlung häufig aufgetretene Veränderung der Zusammensetzung von Pflanzeninhaltsstoffen, insbesondere der phenolischen Pigmente. In welchem Ausmaß hiervon pathogene Insekten oder Mikroorganismen betroffen sind, ist nicht bekannt. Derartige Veränderungen könnten auch für den Abbau von Pflanzenmaterial durch Bodenorganismen (bio-geo-chemischer Zyklus) von Bedeutung sein. Abbildung 8 stellt ein Modell bisheriger Kenntnisse und zu erforschender Problemkreise dar.

#### 4.5 Auswirkungen auf marine Ökosysteme

Die Lebensgemeinschaften in den Weltmeeren stellen das größte Ökosystem auf der Erde dar und bilden über die Nahrungskette von den einzelligen Algen bis zu den Meeressäugern die Basis für einen großen Teil der Ernährung der Menschheit. Die wichtigsten Mitglieder dieser Lebensgemeinschaft beziehungsweise Nahrungskette sind,

- das Phytoplankton, das heißt die pflanzlichen Mikroorganismen, die als Primärproduzenten die Basis der Nahrungspyramide darstellen;
- das Zooplankton, tierische Mikroorganismen wie Ruderfußkrebse und freischwimmende Larven von marinen Würmern, Krabben und Stachelhäutern, die als sogenannte Primärkonsumenten vom Phy-

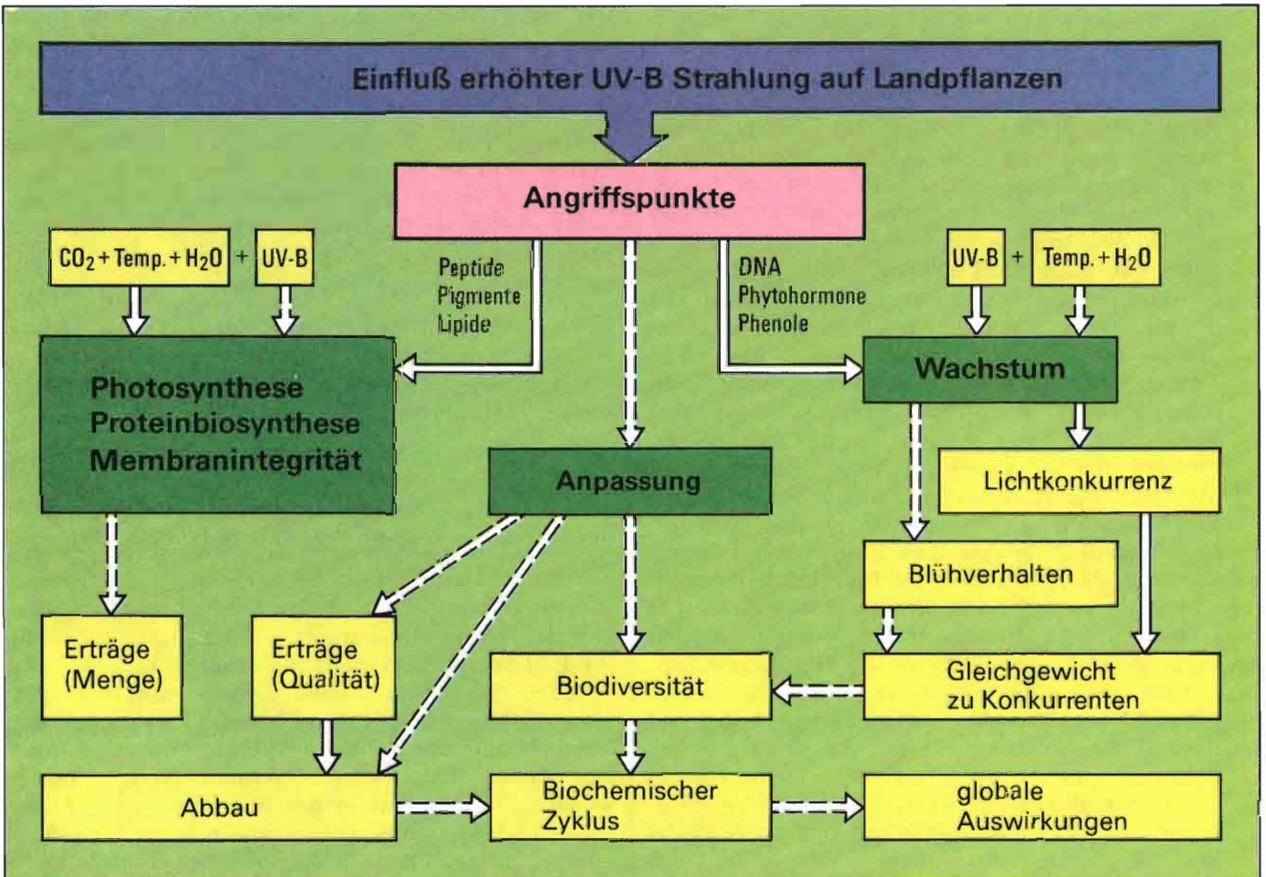


Abb. 8: Modell bisheriger Kenntnisse (—) und zu erforschender Problemkreise (— —).

toplankton leben oder sich als Sekundärkonsumenten untereinander räuberisch verhalten, sowie

- die Konsumenten höherer Ordnung, zu denen Fische, Krebstiere, Tintenfische und marine Säugetiere gehören.

Zahlreiche Untersuchungen bestätigen, daß der Bestand der Mitglieder dieser Lebensgemeinschaft und damit das Gleichgewicht des marinen Ökosystems durch eine Erhöhung der UV-B-Strahlung gefährdet ist.

#### 4.5.1 Phytoplankton

##### – Ökologische Bedeutung

Photosynthetische Organismen unseres Planeten fixieren jährlich schätzungsweise  $10^{11}$  Tonnen Kohlenstoff (69). Das Phytoplankton hat daran einen Anteil von etwa 30 bis 40 Prozent, also 3 bis  $4 \times 10^{10}$  Tonnen. Global betrachtet nehmen diese Organismen eine Reihe wichtiger Funktionen wahr, von denen insbesondere zwei herausragen:

- Phytoplankton stellt die Basis der biologischen Nahrungskette dar, die Grundlage für die Existenz von primären und sekundären Verbrauchern, also Fischen, Vögeln und Säugern bis hin zum Menschen. Da ein erheblicher Teil tierischen Proteins zur menschlichen Ernährung aus dem Meer stammt, sind die Planktonorganismen für einen erheblichen Teil der Nahrungsmittelproduktion unmittelbar oder indirekt verantwortlich.
- Phytoplankton ist Teil des globalen Kohlenstoffkreislaufes. Die Weltmeere stellen die größte Senke für atmosphärisches Kohlendioxid dar. Kohlendioxid befindet sich in einem globalen Zyklus: Etwa 140 Gigatonnen Kohlenstoff werden jährlich von den Weltmeeren und den terrestrischen Pflanzen aufgenommen. Dieselbe Menge wird aber auch wieder frei und gelangt in die Atmosphäre zurück. Zusätzlich werden jährlich etwa 5 bis 6 Gigatonnen Kohlenstoff aus der Verbrennung fossiler Energieträger und, nach Abschätzung der neuesten Rodungsraten, weitere zwei Gigatonnen aus der Vernichtung der tropischen Wälder in die Atmosphäre freigesetzt. Etwa 50 Prozent des durch menschliche Aktivitäten verursachten Gesamtausstoßes an  $\text{CO}_2$  wird zur Zeit aus der Atmosphäre entfernt und vor allem durch den Ozean aufgenommen. Wie stark an diesem Prozeß das marine Phytoplankton beteiligt ist, ist noch nicht bekannt. Das Phytoplankton bindet durch seine photosynthetische Aktivität in der lichtdurchfluteten obersten Wasserschicht den dort gelösten Kohlenstoff in das Gewebe beziehungsweise bei Kalkalgen auch in die Kalkschale ein. Die Nettoprimärproduktion des Phytoplanktons in einem Jahr erreicht dabei 30 bis 40 Gigatonnen Kohlenstoff. Ein Teil dieser Biomasse sinkt als sogenannter ozeanischer Schnee ab, löst sich zum Teil wieder auf und lagert sich nur zu einem recht kleinen Teil am Meeresboden ab. Nur dieser kleine Teil ist dem Kohlenstoffkreislauf längerfristig entzogen. Insgesamt wird das Kohlenstoffreservoir der Ozeane auf 36 000 Gigatonnen geschätzt.

##### – Schädigung

Marine Algen sind als photosynthetische Organismen auf den oberen, von Sonnenlicht durchfluteten Teil des Meereswassers angewiesen. Sie sind in den obersten Metern der Wassersäule aber nicht gleichmäßig verteilt, sondern suchen durch präzise Orientierungsbewegungen aktiv die für sie optimalen Bereiche von Licht, Schwerkraft, chemischen Gradienten, Temperatur und Magnetfeld auf (70). Dort sind sie gleichzeitig der ultravioletten Strahlung ausgesetzt, die die Organismen bereits in kurzer Zeit direkt oder indirekt schädigen kann, da Algen im Gegensatz zu Landpflanzen keine Schutzmechanismen in ihrer Oberfläche besitzen. Untersuchungen wiesen massive Schädigungen des Phytoplanktons durch UV-B-Strahlung hinsichtlich

- der Beweglichkeit der Organismen,
- der Orientierung an äußeren Faktoren wie Licht und Schwerkraft,
- der Photosynthese und daher der Produktion an Biomasse,
- des Stickstoffeinbaus in Proteine und Enzyme sowie
- weiterer struktureller und physiologischer Parameter nach.

In Laboruntersuchungen wurde nachgewiesen, daß die verschiedensten Arten von Algen (Blualgen, Grünalgen, Flagellaten) unter dem Einfluß von gefiltertem Sonnenlicht (ohne UV-B-Anteil) erheblich beweglicher sind als unter natürlichem Sonnenlicht. Dies legt den Schluß nahe, daß eine weitere Erhöhung des solaren UV-B-Anteils einen entsprechenden negativen Einfluß haben würde (71; 72).

Photosynthetische Mikroalgen sind einerseits auf das Sonnenlicht als Energiequelle angewiesen, das heißt sie können nur mit Licht wachsen, werden aber andererseits bei zuviel Sonnenlicht geschädigt, weil die zur Photosynthese notwendigen Pigmente zerstört werden.

Es konnte nachgewiesen werden, daß auch der Orientierungsmechanismus, der es den Algen erlaubt, Zonen optimaler Lichtintensität aufzusuchen, durch UV-B-Strahlung massiv geschädigt wird (73).

Beweglichkeit und Orientierungsfähigkeit sind aber angesichts des Mangels an Schutzmechanismen wie Pigmentbildung die grundlegende Voraussetzung für das Überleben und die Produktivität von Phytoplankton.

Indem verstärkte UV-B-Strahlung die Konzentration der Photosynthesepigmente verringert, wird die Produktion von ATP (Adenosin-triphosphat) und NADPH (Nicotin-amid-adenin-dinucleotid-hydrogenphosphat) vermindert. Dies bedeutet eine generelle Verringerung der Kohlendioxidfixierung durch marines Phytoplankton. Dafür verantwortlich gemacht werden die Schädigung des Photosystems II, Membranschädigungen und eine Verminderung des zellulären Lipidgehalts (74). Neben der photosynthetischen Bindung von Kohlendioxid ist die Stickstofffixierung ein weiterer Schlüsselprozeß für Wachstum und

Produktivität, da sie die Voraussetzung für die Synthese von Proteinen ist. So konnte nachgewiesen werden, daß das für die Stickstoffassimilierung verantwortliche Enzym Nitrogenase durch Licht aktiviert, durch UV-B-Strahlung aber inaktiviert wird. Auf die grundlegende Bedeutung stickstofffixierender Algen für die landwirtschaftliche Produktivität wurde bereits hingewiesen (vgl.Nr.4.4.4).

### – Gegenwärtige Situation

Laboruntersuchungen, Freilandbeobachtungen unter kontrollierten Versuchsbedingungen und Messungen im offenen Meer zeigen mit zunehmender Deutlichkeit, daß die Mikroorganismen, aus denen sich das Plankton zusammensetzt, bereits unter den derzeitigen Strahlungsverhältnissen unter erheblichem UV-Streß stehen können. Die Zahl der Phytoplankter pro Volumeneinheit wird vor allem vom Nährstoffangebot, der Sonnenstrahlung, aber nur wenig von der Temperatur bestimmt. In großen Teilen des Ozeans ist Phosphat der begrenzende Faktor für das Algenwachstum, aber auch Stickstoffverbindungen und sogar Eisen als Spurenmittel können solche begrenzenden Faktoren sein. Deshalb tritt in höheren mittleren Breiten zum Beispiel die sogenannte Frühjahrsblüte in dem Zeitabschnitt auf, in dem zum erstenmal nach der tieferen Durchmischung im Winter ausreichend Sonnenlicht in der dann nährstoffreichen Deckschicht vorhanden ist. Bei ausreichendem Nährstoffangebot und Sonnenlicht ist Phytoplanktonwachstum zu allen Zeiten möglich. Laboruntersuchungen sowie Freilanduntersuchungen in der Antarktis lassen aber auch den Schluß zu, daß die gegenwärtige Intensität der UV-B-Strahlung ebenfalls einen begrenzenden ökologischen Faktor für einen Teil des marinen Ökosystems darstellt. Ein Anstieg der UV-B-Exposition könnte daher bedeutende Veränderungen des Ökosystems zur Folge haben (75; 76). Erste Freilanduntersuchungen in den Gewässern vor der Antarktis wiesen nach, daß die Photosyntheseleistung in den oberen zehn Metern des Wassers während des Auftretens des sogenannten Ozonlochs 30 Prozent unter der an einem Tag außerhalb des Auftretens des Ozonlochs liegt.

### 4.5.2 Konsumenten und Nahrungskette

Die Konsumenten erster und höherer Ordnung in der Nahrungskette werden in zweifacher Weise durch eine Erhöhung der UV-B-Strahlung betroffen. Zum einen bedeutet eine Verringerung der Biomasse des marinen Phytoplanktons eine Einschränkung ihrer Nahrungsgrundlage, zum anderen sind sie zum Teil auch direkt durch UV-B-Strahlung betroffen. Verschiedene Experimente haben gezeigt, daß UV-B-Strahlung Jungfische, Krebslarven, Krabbenlarven und andere kleine Tiere direkt schädigt, indem Überlebens-, Wachstums- und Fortpflanzungsrate eingeschränkt werden. Für eine Art von Schalentieren wurde nachgewiesen, daß bereits geringere UV-B-Dosen, als in der Regel an der Wasseroberfläche auftreten, eine 50 prozentige Mortalität verursachen. Dies hat vor allem Konsequenzen für die Larven und Eier eines großen Teils der wirtschaftlich bedeuten-

den Fische und Meerestiere, da sie in der der Oberfläche nächsten Meereschicht (zum Beispiel im Wattenmeer) leben. Für die Hälfte der bisher untersuchten Arten würde eine 16prozentige Ozonreduktion in gemäßigten Breiten bedeuten, daß sie im freien Oberflächenwasser (ein Meter Tiefe) innerhalb von weniger als fünf Sommertagen eine tödliche (50 Prozent Mortalität) UV-B-Strahlendosis erhalten. Für den Anchovis, dessen Larven in zahlreichen Schelfregionen gerade im Zeitraum der intensivsten Sonneneinstrahlung (Juni bis August) auftreten, würde ein derartiger Abbau des Ozons in der Stratosphäre zu einer um 50 beziehungsweise 100 Prozent verminderten Überlebensrate bei zwei beziehungsweise zwölf Tage alten Larven führen (77).

### 4.5.3 Globale Konsequenzen

Die Schädigung des marinen Ökosystems durch erhöhte solare UV-Strahlung läßt sich heute noch nicht quantifizieren, da zum einen das notwendige Meßinstrumentarium fehlt und zum anderen keine Langzeitmessungen durchgeführt worden sind. Als Folge einer Schädigung des marinen Phytoplanktons durch eine erhöhte UV-B-Strahlung werden erwartet:

#### *Änderungen der Artenzusammensetzung des Phytoplanktons und der nachgeschalteten Verbraucher in der Nahrungskette*

Die unterschiedliche UV-Empfindlichkeit der Organismen könnte zu Veränderungen innerhalb der Artenzusammensetzung und damit zur Störung des ökologischen Gleichgewichts führen, da die in der biologischen Nahrungskette nachgeschalteten tierischen Verbraucher auf bestimmte Futterorganismen angewiesen sind. Es wäre dann von starken Veränderungen innerhalb der gesamten Nahrungskette auszugehen.

#### *Reduzierung der Nettoprimärproduktion und Auswirkung auf die Nahrungskette*

Eine fünfprozentige Abnahme der Primärproduktion (geschätzt für einen sechzehnprozentigen Ozonabbau) würde zu einer Verminderung der Fischerträge um sechs bis neun Prozent führen. Global gerechnet entspricht eine siebenprozentige Reduktion der Fischereierträge einem Verlust von  $6 \times 10^7$  Tonnen Fisch pro Jahr. Weitere Einbußen für die Fischproduktion als vorletztem Glied am Ende der Nahrungskette ergäben sich durch die direkte Schädigung der Eier- und Larvenstadien von Krebsen und Fischen durch UV-B-Strahlung (58).

#### *Mögliche Folgen für das Klima*

Da das marine Phytoplankton einen Teil des globalen Kohlenstoffkreislaufs darstellt und in einem noch nicht bekannten Ausmaß an der Funktion der Ozeane als Senke für anthropogenen Kohlenstoff beteiligt ist,

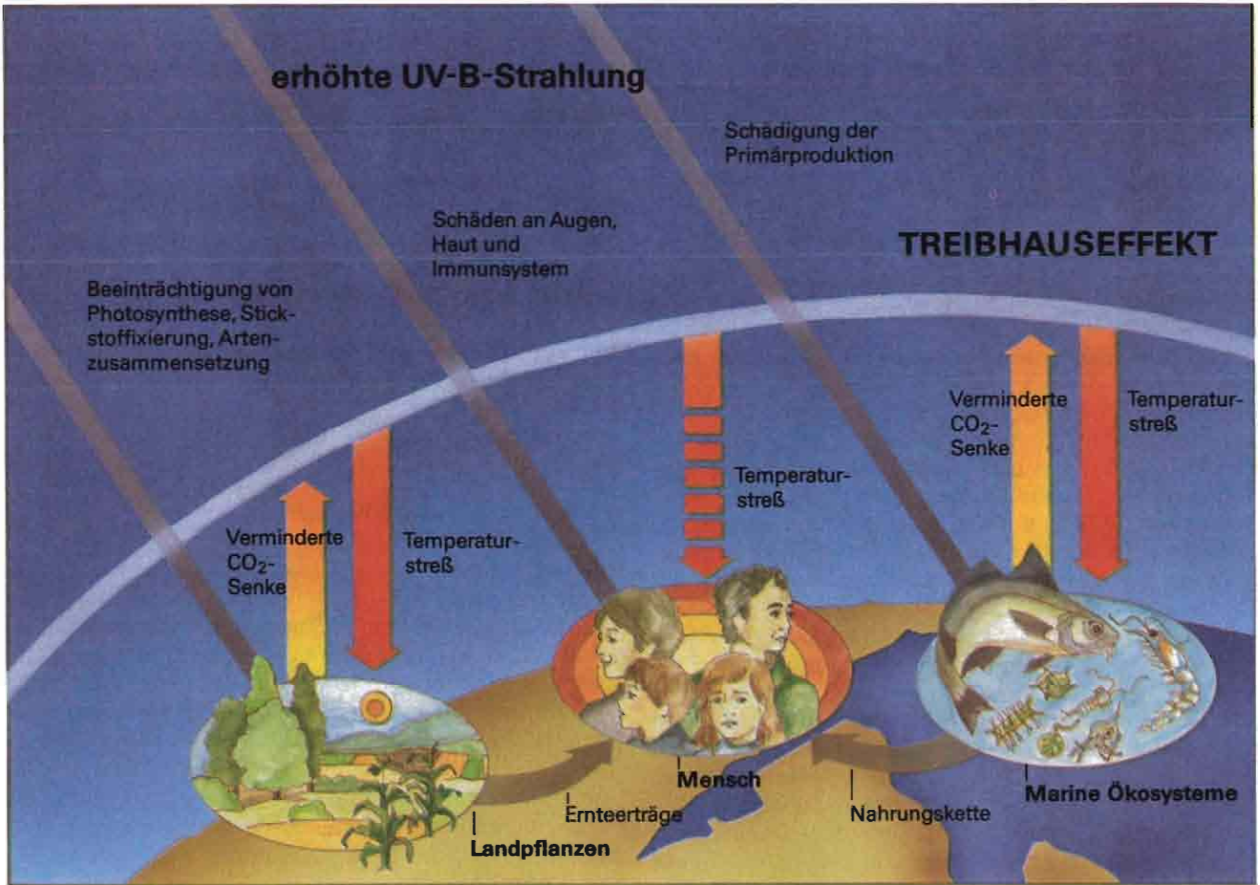


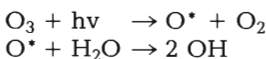
Abb. 9: Rückkopplungen zwischen erhöhter UV-B-Strahlung und Auswirkungen des Treibhauseffektes auf die Biosphäre.

ergäbe sich aus einer UV-bedingten Schädigung des Phytoplanktons ein Beitrag zur globalen Klimaänderung.

Abbildung 9 stellt die Rückkopplungen zwischen erhöhter UV-B-Strahlung und Auswirkungen des Treibhauseffektes auf die Biosphäre dar.

#### 4.6 Einfluß vermehrter UV-B-Strahlung auf die Chemie der Atmosphäre

Die chemische Reinigungskraft in der Atmosphäre wird hauptsächlich durch Reaktionen von OH Radikalen bestimmt. Diese werden wie folgt durch die Einwirkung der UV-Strahlung auf das Ozon in der Troposphäre unter der Bildung elektronisch angeregter Sauerstoffatome O\*, und deren Reaktion mit Wasserdampf gebildet (sofern die Wellenlänge der Sonneneinstrahlung,  $h\nu$ , größer 310 nm ist)



Die Bildung der elektronisch angeregten O-Atome und OH-Radikale hängt damit von der Konzentration des Ozons und des Wasserdampfs in der Troposphäre und der UV-Strahlung ab. Letztere wird stark von der Gesamtsäulendichte des atmosphärischen Ozons be-

stimmt. Eine Abnahme des Ozongehalts in der Stratosphäre würde somit eine Zunahme der OH-Konzentrationen in der Troposphäre bewirken und die Selbstreinigungskraft der Atmosphäre fördern. In belasteten Gebieten wird dies direkt wirksam werden, während in Reinluftgebieten dieser Effekt wegen der zu erwartenden Abnahme der OH-Radikalreaktionen als Folge der Zunahme der CH<sub>4</sub>- und CO-Konzentrationen schwächer wird.

#### 5. Rückkopplungen zwischen Ozonänderung, UV-B-Intensität und Temperatur

Die vorangehende getrennte Diskussion des Einflusses anthropogener Spurengase auf Klima und Ozongehalt ließ die Wechselwirkung zwischen beiden globalen Umweltproblemen nicht ausreichend erkennen. Beide sind über Änderungen der Strahlungsflußdichte gekoppelt. Hier soll daher der Versuch gemacht werden, Kopplungen zwischen Änderungen der chemischen Zusammensetzung, der UV-B-Intensität, der Strahlungsflußdichte und damit der Temperatur in den Teilbereichen getrennt sowie untereinander aufzuzeigen. Es muß dabei betont werden, daß einige der Kopplungen und Synergismen zur Zeit nur qualitativ bekannt sind und deshalb nur die Tendenzen angegeben werden können.

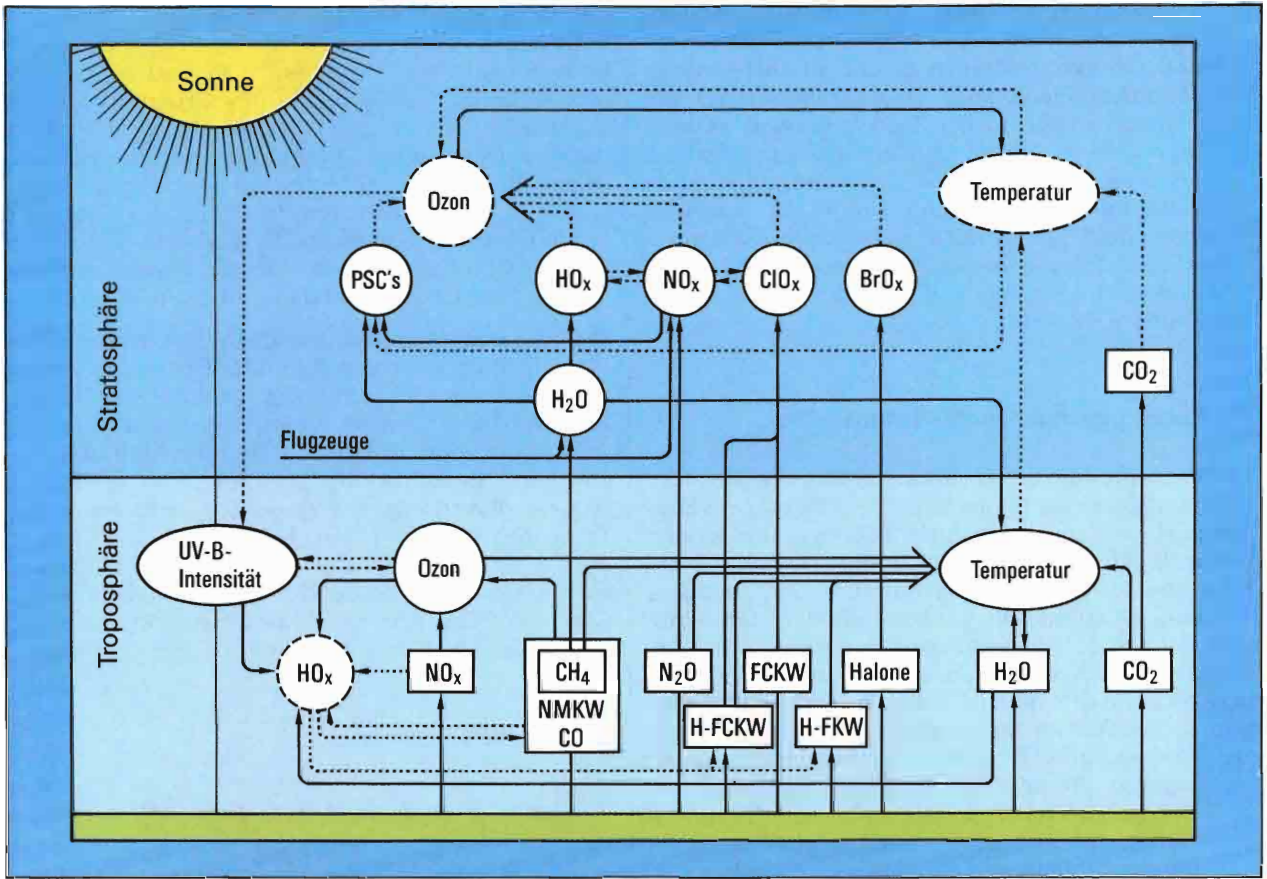


Abb. 10: Einige wichtige Rückkopplungen zwischen Veränderungen der chemischen Zusammensetzung, der Temperatur und der UV-B-Intensität in Troposphäre und Stratosphäre ohne Berücksichtigung der Biosphäre (79). Gestrichelte Umrandung der Substanz oder des Parameters bedeuten Trend zur Zunahme, geschlossene Umrandungen einen Trend zur Abnahme. Die Verbindungslinien sind durchgezogen dargestellt für positive Rückkopplungen und gepunktet für negative.

Der Zusammenhang zwischen ozon- und klimawirksamen Spurengasen, Temperatur und UV-B-Intensität ist schematisch in Abbildung 10 gezeigt.

### 5.1 Rückkopplungen in der Troposphäre

Die IR-Strahlungsflußdichte in der Troposphäre und damit die Temperatur wird durch die klimawirksamen Spurengase Wasserdampf ( $H_2O$ ), Kohlendioxid ( $CO_2$ ), Distickstoffoxid ( $N_2O$ ), Methan ( $CH_4$ ), Ozon ( $O_3$ ) und FCKW bestimmt. H-FCKW und H-FKW, die als Ersatzstoffe für FCKW zum Teil schon verwendet werden, könnten zukünftig ebenfalls einen Beitrag zum zusätzlichen Treibhauseffekt leisten. Andere Spurengase der Troposphäre wie Nicht-Methan-Kohlenwasserstoffe (NMKW), Kohlenmonoxid (CO) und Stickoxide ( $NO_x$ ) tragen aufgrund ihrer geringen Konzentration (NMKW) und/oder ihrer geringen Absorption (CO,  $NO_x$ ) nicht wesentlich zum Treibhauseffekt bei. Von den direkt klimawirksamen Spurengasen der Troposphäre sind nun  $CH_4$  und  $O_3$  auch chemisch wirksam. Die Bildung des Ozons in der Troposphäre ist eine direkte Folge der Oxidation des  $CH_4$  in Gegenwart von  $NO_x$ . Auch die Oxidation von NMKW und CO führt zur Bildung von Ozon. Eine Erhöhung der Konzentration von  $CH_4$ , NMKW und CO hat des-

halb immer dann eine Erhöhung der Ozonkonzentration zur Folge, wenn die Konzentration des  $NO_x$  mindestens 20 ppt beträgt, was für weite Bereiche der Nordhemisphäre gilt. Ozon und  $CH_4$  sind auch über die  $HO_x$ -Radikale miteinander korreliert. Die Photolyse des Ozons durch UV-B-Strahlung ist die wichtigste Quelle des OH-Radikals. Andererseits bestimmt die Konzentration des OH-Radikals aber auch die Lebensdauer und damit die Konzentration des  $CH_4$ : Zunehmendes Ozon heißt grundsätzlich zunehmendes  $HO_x$  und erhöhte Abbauraten für  $CH_4$ . Damit wäre die Folge zunehmendes  $CH_4 \rightarrow$  zunehmendes  $O_3 \rightarrow$  zunehmendes OH  $\rightarrow$  abnehmendes  $CH_4$  selbst regulierend. Diese einfache negative Korrelation zwischen  $O_3$  und  $CH_4$  wird aber nicht beobachtet. Der Grund ist vermutlich der Trend des  $HO_x$ -Systems:  $HO_x$  wird nicht nur durch das Ozon verstärkt, sondern durch CO und  $CH_4$  verringert. Modellrechnungen bei Beachtung der Trends deuten auf eine Abnahme der  $HO_x$ -Konzentration hin.

$HO_x$  in der Troposphäre ist grundsätzlich auch mit der Temperatur und der UV-B-Strahlung korreliert und damit sowohl an das Klima als auch an die Ozongesamtsäule gekoppelt. Eine erhöhte Troposphärentemperatur hat einen erhöhten Wasserdampfgehalt der Troposphäre und damit ein höheres  $HO_x$ -Niveau zur Folge.  $HO_x$  wird auch erhöht bei zunehmender UV-

B-Intensität. Dies gilt immer dann uneingeschränkt, wenn die Zunahme von UV-B eine Folge der abnehmenden Ozonkonzentration in der Stratosphäre ist. Der Zusammenhang von UV-B-Strahlung mit der Ozon-Konzentration in der Troposphäre ist komplizierter, da beide Größen zweifach negativ korreliert sind. Eine zunehmende Ozon-Konzentration schwächt die UV-B-Strahlung. Umgekehrt schwächt zunehmende UV-B-Strahlung die Ozon-Konzentration, da die Photolyse des Ozons im UV-B-Bereich einen wesentlichen Verlustfaktor des Ozons in der Troposphäre darstellt.

## 5.2 Rückkopplungen in der Stratosphäre

Die Konzentration des Ozons in der Stratosphäre wird bestimmt durch die photochemische Bildung aus Sauerstoff sowie den Abbau durch Photolyse und katalytische Reaktionen unter Beteiligung von  $\text{HO}_x$ ,  $\text{NO}_x$ ,  $\text{ClO}_x$  und  $\text{BrO}_x$ . Da die Konzentration der Quellgase von  $\text{NO}_x$ ,  $\text{ClO}_x$  und  $\text{BrO}_x$  zunimmt, sinkt die Ozonkonzentration in der Stratosphäre. Ozon ist aufgrund seiner Absorption von Sonnenstrahlung im ultravioletten und sichtbaren Spektral-Bereich der wesentliche Wärmespender der Stratosphäre. Eine abnehmende Ozonkonzentration führt daher zu einer Kühlung der Stratosphäre. Temperatur und Ozonkonzentration sind zweifach korreliert: Eine abnehmende Temperatur verlangsamt die katalytischen Gasphasenreaktionen des Ozonabbaus und wirkt dem Ozonverlust entgegen. Dies wird sich vornehmlich dort auswirken, wo die Ozonverluste durch Reaktionen in der homogenen Gasphase bestimmt sind. Abnehmende Temperatur bedeutet aber auch mehr polare stratosphärische Wolken und damit eine Zunahme des durch heterogene Reaktionen induzierten Ozonabbaus, vorwiegend in den Polarregionen. Diese Wolken und damit ein heterogener Ozonverlust werden bei zunehmenden Konzentrationen von  $\text{NO}_x$  (aus der Zunahme von  $\text{N}_2\text{O}$ ) und  $\text{H}_2\text{O}$ -Dampf (aus der Zunahme von  $\text{CH}_4$ ) verstärkt.

## 5.3 Rückkopplung zwischen Troposphäre und Stratosphäre

Die Wärmestahlungsbilanz der Stratosphäre wird von der Abstrahlung durch  $\text{CO}_2$  und  $\text{O}_3$  bestimmt. Zunehmende anthropogene  $\text{CO}_2$ -Emissionen führen deshalb neben einer Erwärmung der Troposphäre zu einer Abkühlung der Stratosphäre. Der „Umkehrpunkt“ von Kühlung zu Erwärmung liegt in der unteren Stratosphäre bei etwa 20 km. Andere klimawirksame Spurengase wirken gleichsinnig auf die Temperatur der Stratosphäre, nur ist ihr Effekt auch vom starken Konzentrationsgradienten als Folge chemischer Umwandlung in der Stratosphäre abhängig. Die abnehmende Temperatur wirkt im oben beschriebenen Sinne auf die stratosphärische Ozonkonzentration ein.

Alle Quellgase der Ozonabbau-Katalysatoren in der Stratosphäre, mit Ausnahme des  $\text{NO}_x$  und eines Teils von  $\text{H}_2\text{O}$ , sind troposphärischen und zum Teil anthropogenen Ursprungs. Eine Erhöhung ihrer Konzentra-

tionen verstärkt den Ozonabbau. Eine besondere Rolle spielt  $\text{CH}_4$ . Seine kohlenstoffhaltigen Oxidationsprodukte wie  $\text{CH}_2\text{O}$  und  $\text{CO}$  sind nicht selbst ozonwirksam. Die Oxidation des  $\text{CH}_4$  führt aber zu zusätzlicher Bildung von  $\text{HO}_x$ , beziehungsweise  $\text{H}_2\text{O}$ , die direkt oder indirekt (über eine erhöhte PSC-Bildung) die Ozonkonzentrationen reduzieren. In bestimmten Höhenbereichen, in denen das  $\text{CH}_4$  auch durch Cl-Atome umgewandelt wird, hat eine zunehmende  $\text{CH}_4$ -Konzentration eine Schwächung des  $\text{ClO}_x$ -induzierten Ozonabbaus zur Folge.

Die Abnahme des Ozons in der Stratosphäre ist bei gleichbleibender Abstrahlung der Sonne die einzige Ursache für eine Zunahme der UV-B-Intensität in der Troposphäre. Hieraus resultiert eine wichtige chemische Rückkopplung zwischen Stratosphäre und Troposphäre: Zunehmende UV-B-Intensität erhöht die  $\text{HO}_x$ - und verringert die Ozon-Konzentration in der Troposphäre (siehe oben). Die Bildung von Ozon in der Troposphäre als Folge der Emission von Kohlenwasserstoffen und Stickoxiden wirkt der durch den Abbau des Ozons in der Stratosphäre bewirkten Zunahme der UV-B-Intensität in Bodennähe entgegen.

## 6. Literaturverzeichnis

1. Barton, I.J.: Australian Physical Sciences in Medicine, 81, S. 199 (1979)
2. Ilyas, M.: Effect of Cloudiness on solar ultraviolet radiation reading Surface. Atmos. Environ 21, 1483-1484 (1987)
3. Brühl, C. und P.J. Crutzen: On the disproportionate role of tropospheric ozone as a filter against solar UV-B-radiation. Geophysical Research Letters, 16, 703; 1989
4. Blumthaler, M. und W. Ambach: Indication of Increasing Solar Ultraviolet-B Radiation Flux in Alpin Regions. Science, 248, 1990, S. 206
5. Bener, P.: Approximate values of intensity of natural UV radiation for different amounts of atmospheric ozone, Final report, US Army Contract No. DAJA 37-68-C-1017, Davos, (1972)
6. Caldwell, M.M.; S. Madronich; L.O. Björn und M. Ilyas: Ozone reduction and increased ultraviolet radiation. UNEP Environmental Effect Report, Chapter 1, 1989, S. 1-10
7. World Meteorological Organisation 20, 1990
8. Scotto, J. u. a.: Biologically Effective Ultraviolet Radiation: Surface Measurements in the United States, 1974-1985; Science, 239, 1988, S. 762-764
9. Blumenthaler und Ambach 1990
10. Stachelin, G. und Dütsch, H.: Chimia 43, 1989, S. 338
11. Caldwell, M.M., L.B. Camp, C.W. Warner und S.D. Flint: Stratospheric Ozone Reduction. in: Solar Ultraviolet Radiation and Plant Life. R.C. Worrest, M.M. Caldwell (Hrsg), Springer 1986
12. Lubin, D.; Frederick, G.E.; Booth, C.R.; Lucas, T. und Neuschuber, D.: Geophysical Research Letters, 16, 1985, S. 783
13. Brühl, C. und Crutzen, P.J.: On the Disproportionate Role of Tropospheric Ozone as a Filter against Solar UV-B Radiation. Geophysical Research Letters, 16, No. 7, 1989, S. 703-706
14. Dehne, K.: Zur Variation von Absolut- und Relativwerten der UV-Globalstrahlung, Abs. 3.2ff. in: Wirkungen von UV-

- B-Strahlung auf Pflanzen und Tiere (2. Franz-Ruttner-Symposium), Laufener Seminarbeiträge 3/88, Akademie für Naturschutz und Landschaftspflege, 1989
15. Halpern, P.; Dave, J.V. und Braslau, N.: Sea-Level Solar Radiation in the Biologically Active Spectrum. *Science*, 186, 1974, S. 1204-1208
  16. Köhler, U. u. a.: Vergleich und Bewertung von 2 Spektrophotometern zur Messung des Gesamt ozons. *Meteorologische Rundschau* 42, 1989, S. 1-9
  17. Kaase, H.; Bischoff, K. und Metzendorf, J.: Strahlernormale. in: Vieth, G.; Kaase, H. (Hrsg.): *Spektralradiometrie: Methodik, Meßtechnik, Anwendung*. PT-Bericht Opt – 24, 1986
  18. Dehne, K.: Schriftliche Stellungnahme anlässlich der Anhörung „Ozonabbau in der Stratosphäre – Erkenntnisse, Auswirkungen, FCKW-Ausstieg und die Folgen“. In: EK-Drucksache 11/137, 1990, S. 85-94
  19. Berger, D.S. und Urbach F.: A Climatology of Sunburning Ultraviolet Radiation. *Photochem. Photobiol.* 35, 1982, S. 187-192
  20. Scotto u. a. 1988
  21. Dehne 1990, S. 76-78
  22. United Nations Environmental Programm: Environmental Effects Panel Report. November 1989, S. 19
  23. Kiefer: Biologische Strahlenwirkung. 1989, S. 117
  24. Urbach, F.: Schriftliche Stellungnahme anlässlich der Anhörung „Fluorchlorkohlenwasserstoffe und stratosphärisches Ozon“. in: EK-Drucksache 11/18, S. 15
  25. Kiefer 1989, S. 121
  26. Kiefer 1989, S. 118
  27. Kiefer 1989, S. 294, nach Turell und Pidou 1987
  28. Madronich, S., J. Frederik, G. Basseur und M.M. Caldwell: Predicted changes in surface UV-radiation. in: Draft UNEP Atmospheric Sciences Panel Report, 1989. zit. in: United Nations Environment Programm. Environmental Effects Panel Report, November 1989, S. 7
  29. Pitts, D.G.: The effects of exposure of the eye to ultraviolet radiation. in: *Environmental Vision*, 1989
  30. Maitcouk, I. F.: Trachoma and Cataract: Two WHO targets. in: *Int. Nurse. Rev.*, 32, S. 23-25, 1985
  31. Taylor, H.R., S.K. West, F.S. Rosenthal, M. Beatriz, H.S. Newland, H. Abbey und E.A. Emmett: Effect of ultraviolet radiation on cataract formation. *New England Journal of Medicine*, 319, S. 1429-1433, 1988
  32. Bochow, T.W., S.K. West, A. Azar, B. Munos, A. Sommes und H.R. Taylor: Ultraviolet light exposure and the risk of posterior subcapsular cataract. *Archiv Ophthalmol.*, 107, 1989, S. 369-372
  33. UNEP 1989, S. 14
  34. Baadgaart, O., C.H. Wulf, G. L. Wantzin und K.D. Cooper: UV-B and UV-C, but not UV-A, potentially induce the appearance of T6-DR + antigen presenting cells in human epidermis. in: *Journal of Investigations in Dermatology*, 89, 1987, S. 113-118
  35. De Fabo, E.C. und F.P. Noonan: Mechanisms of immune suppression by ultraviolet irradiation in vivo. Part I: Evidence for the existence of a unique photoreceptor in skin and its role in photoimmunology. *Journal of Experimental Medicine*, 157, 1983, S. 84-98
  36. Elmetts C.A., P.R. Bergstresser, R.E. Tiegelaar, P.J. Wood und J.W. Streilein: Analysis of the mechanism of unresponsiveness produced by haptens painted on skin exposed to low dose ultraviolet radiation. *Journal of Experimental Medicine*, 158, 1983, S. 781-794
  37. UNEP, 1989, S. 16-17
  38. Scotto, J., T.R. Fears, J.F. Fraumeni.: Incidence of Non Melanoma Skin Cancer in the United States. US Department of Health and Human Services, NIH publications, NR. 83-2433, 1983
  39. Sober, A.J.: Solar exposure in the etiology of cutaneous melanoma. *Photodermatology* 4, 1987, S. 23-31
  40. Scotto u. a. 1983
  41. Isaacson, C.: Cancer in the skin in urban blacks in South Africa. *British Journal of Dermatology* 100, 1979, S. 347-350
  42. Sterenberg, H.J.C.M. und J.C. van der Leun: Action spectra for tumorigenesis by ultraviolet radiation. in: *Human Exposure to Ultraviolet Radiation: Risks and regulations*, W.F. Passchier und B.F.M. Bosnjakovic (Hrsg.) Amsterdam 1987, S. 173-190
  43. Slaper, H.: Skin Cancer and UV Exposure: Investigations on the Estimation of Risk. Utrecht 1987
  44. Slaper 1987
  45. UNEP 1989
  46. US EPA: Ultraviolet radiation and melanoma-with a special focus on assessing the risks of ozone depletion. Vol. 4, J.D. Longstrath (Hrsg.), EPA 400/1- 87/00 1d, U.S. Environmental Protection Agency, Washington D.C. 1987
  47. UNEP 1989 S.21
  48. UNEP 1989 S. 21
  49. Marx, Robin: Possible effects of increased ultraviolet radiation on the incidence of non-melanocytic skin cancer. In: Health effects of ozone layer depletion – a report of the NHMRC working party, Melbourne 1989, National Health and Medical Research Council, in: EK-Drucksache 11/116 S. 71
  50. Gilles, Grayham G.: Possible effects of increased exposure to ultraviolet radiation on the incidence of cutaneous malignant melanoma. In: Health-effects of ozone layer depletion – a report of the NHMRC working party, Melbourne 1989, National Health and Medical Research Council, in: EK-Drucksache 11/S.87
  51. Tevini, M.: Schriftliche Stellungnahme anlässlich der Anhörung „Fluorchlorkohlenwasserstoffe und stratosphärisches Ozon“ in: EK-Drucksache 11/16, 1988, S. 132
  52. Tevini, M.: Schriftliche Stellungnahme anlässlich der Anhörung „Ozonabbau in der Stratosphäre – Erkenntnisse, Auswirkungen, FCKW-Ausstieg und die Folgen“. In: EK-Drucksache 11/138, 1990, S. 5
  53. Barnes, P.W. u. a.: Competition, morphology and canopy structure in wheat (*Triticum aestivum* L.) and wild oat (*Avena fatua* L.) exposed to enhanced ultraviolet-B-radiation. *Functional Ecology*, 2, 1988, S. 319-330
  54. Beyschlag, W. u. a.: Enhanced UV-B-radiation has no effect on photosynthetic characteristics of wheat (*Triticum aestivum* L.) and wild oat (*Avena fatua* L.) under greenhouse and field conditions. *Photosynthetica* 224, 1988, S. 516-525
  55. Tevini 1990
  56. Tevini, M.; Braun, J.; Grusemann, P. und Ros, J.: UV-Wirkungen auf Nutzpflanzen. In: Laufener Seminarbeiträge 3, 1988, Akademie für Naturschutz und Landschaftspflege, Laufen/Salzach 1989, S. 38-52
  57. Tevini 1988, S. 134
  58. Murphy, T.M. u. a.: Stress-induced efflux of K<sup>+</sup> ion: Environmental control. In: *Growth and Differentiation in Plants*. 1988, Chardigarh, India

59. Murphy, T.M. u. a.: UV-induced synthesis of hydrogen peroxide. *Plant Physiology*, 89, 1989, S. 764
60. Tevini, M. u. a.: Action and action mechanisms of enhanced solar and artificial UV-B-radiation on growth, composition and function of crop plants. Final report 1989, Gesellschaft für Strahlen- und Umweltforschung, München 1989
61. Tevini u. a. 1988
62. Habek, H. u. a.: Induction and photoreversal of bean leaf peroxidase isoenzymes by germicidal and near ultraviolet radiation. *Radiation Biology*, 1, 1974, S. 243-250
63. Huerta, A.J. u. a.: Control of intracellular glutathione and its effect on ultraviolet radiation — induced K<sup>+</sup> efflux in cultured rose cells. *Plant Cell and Environment*, 12, 1989, S. 825-830
64. Hooper, A.B. u. a.: Photoinactivation of ammonia oxidation in *Nitrosomonas*. *Journal of Bacteriology*, 119, 1974, S. 899-906
65. Shears, J.H. u. a.: Spectroscopic evidence for a photosensitive oxygenated state of ammonia monooxygenase in whole cells of *Nitrosomonas europaea*. *Biochemical Journal*, 266, 1985, S. 499-507
66. Endo, M. u. a.: Effects of the interception of near ultraviolet radiation on nitrifier activity and nitrification process in a fertilized andosol under field conditions. *Soil Science and Plant Nutrition* 32, 1986, S. 365-372
67. Sullivan, J.H. und A.H. Teramura: Field study of the interaction between solar ultraviolet-B-radiation and drought on photosynthesis and growth in soybean. *Plant Physiology* 92, 1990, S. 141-146
68. Tevini 1990, verändert nach Caldwell, Teramura und Tevini 1989
69. Houghton, R.A. und G.M. Woodwell: Global Climatic Change. in: *Scientific American* 260, 1989, S. 36-44
70. Nultsch, W. und D.P. Häder: Photomovement in motile microorganisms II. *Photochemistry and Photobiology* 47, 1988, S. 837-869
71. Häder, D.P.: *Ecology*, 29, 1889, S. 273-282
73. UNEP 1989 S. 42
74. Döhler, G.: Impact Of UV-B Radiation On Photosynthetic Assimilation Of <sup>14</sup>C-Bicarbonate And Inorganic <sup>15</sup>N-Compounds By Cyanobacteria. *Z. Naturforsch.*, 41C, 1986, S. 426-432
75. Häder 1990
76. Worrest 1990
77. UNEP 1989, S. 45
78. UNEP 1989
79. Zellner, R.: Chemie über den Wolken — anthropogene Beeinflussung des stratosphärischen Ozons. 1990, in Vorbereitung

## 7. Tabellenverzeichnis

Tab. 1: Verteilung der relativen Strahlungsflußdichte der Sonne auf die einzelnen Wellenlängenbereiche in Bodennähe

## 8. Abbildungsverzeichnis

Abb. 1: Wellenlängenabhängigkeit von Absorptionskoeffizient des Ozons und relativer Erythemwirksamkeit im nahen UV-Bereich

Abb. 2: Jahresgang der Tagesmittel des Verhältnisses UV-B zu Globalstrahlung, gemessen am Jungfrauoch

Abb. 3: Berechnete spektrale UV-Globalstrahlung in Meereshöhe und für wolkenlosen Himmel bei 8 verschiedenen Zenitwinkeln und jeweils 6 Werten der Ozongesamtsäulendichte von 240 bis 440 Dobson-Einheiten

Abb. 4: Berechnete Änderungen der relativen spektralen Strahlungsflußdichte im UV-B-Bereich für die Monate Januar, März und Juli als Folge der im Zeitraum 1970 — 1986 gemessenen Abnahmen der Ozonsäulendichten (prozentuale Abnahmen angegeben in Klammern) in verschiedenen geographischen Breiten der Nordhemisphäre.

Abb. 5: Absorptionsspektrum der DNA

Abb. 6: Aktionsspektrum für die Inaktivierung menschlicher Hautzellen durch langwellige UV-Strahlung

Abb. 7: Berechneter Anstieg der effektiven UV-B-Strahlung für den Zeitraum 1979/1980 bis 1987/1988 aufgrund der Daten für den Ozonabbau in der Stratosphäre nach TOMS.

Abb. 8: Modell bisheriger Kenntnisse und zu erforschender Problemkreise.

Abb. 9: Rückkopplungen zwischen erhöhter UV-B-Strahlung und Treibhauseffekt-Auswirkungen auf die Biosphäre

Abb. 10: Einige wichtige Rückkopplungen zwischen Veränderungen der chemischen Zusammensetzung, der Temperatur und der UV-B-Intensität in Troposphäre und Stratosphäre ohne Berücksichtigung der Biosphäre.



5. KAPITEL

Maßnahmen zur FCKW- und Halonreduzierung

1. Internationale Bemühungen

1.1 Internationale Vereinbarungen

Globale Umweltprobleme wie die Ozonzerstörung in der Stratosphäre können nur durch internationale, rechtlich verbindliche Vereinbarungen effektiv bekämpft werden. Einzelstaatliche und regionale Aktivitäten sind von großer Bedeutung, sie allein können die Gefährdung jedoch nicht abwenden.

Mit dem Wiener Übereinkommen und dessen Folgevereinbarungen, dem Montrealer Protokoll und insbesondere den Vereinbarungen der zweiten Vertragsstaatenkonferenz in London, sind erstmals internationale Vereinbarungen entstanden, die der fortschreitenden globalen Umweltzerstörung Einhalt gebieten sollen. Durch die im Protokoll festgeschriebene Möglichkeit, auf der Grundlage der jeweils verfügbaren umweltrelevanten Informationen aus Wissenschaft, Technik und Wirtschaft Vertragsänderungen vorzunehmen, sind erste konkrete Maßnahmen zum Schutz der Ozonschicht eingeleitet worden. Durch die auf der zweiten Vertragsstaatenkonferenz im Juni 1990 beschlossene Verschärfung der Protokollregelungen wurde das Instrumentarium für einen wirksamen Schutz geschaffen (vgl. Nr. 1.1.3).

1.1.1 Wiener Übereinkommen vom 22. März 1985 zum Schutz der Ozonschicht

Am 22. März 1985 wurde das vom Umweltprogramm der Vereinten Nationen (UNEP) erarbeitete Übereinkommen zum Schutz der Ozonschicht in Wien unterzeichnet. Nach Ratifikation durch die notwendige Zahl von zwanzig Staaten ist dieses Übereinkommen am 22. September 1988 in Kraft getreten.

Das Wiener Übereinkommen enthält als Rahmenkonvention keine konkreten Maßnahmen zum Schutz der Ozonschicht, sondern muß durch Folgeprotokolle konkretisiert und ergänzt werden.

Die Vertragsparteien verpflichten sich darin, alle angemessenen Maßnahmen zu treffen, um die menschliche Gesundheit und die Umwelt vor schädlichen Auswirkungen einer vom Menschen verursachten Veränderung der Ozonschicht zu schützen und klimatische Auswirkungen zu verhindern. Besonders bemerkenswert ist, daß das Übereinkommen auch Handlungsmaßnahmen vorschreibt, wenn Ozonveränderungen nicht bewiesen, sondern nur wahrscheinlich sind. Damit wird erstmals auf internationaler Ebene im Bereich des Umweltschutzes das Prinzip der Vorsorge angewandt (vgl. dazu im einzelnen 1. Bericht, Abschnitt C, 3. Kap., Nr. 3.2).

Der Stand der Unterzeichnung und Ratifikation der Wiener Konvention ist in Tabelle 1 verzeichnet.

Tabelle 1

Wiener Übereinkommen zum Schutz der Ozonschicht vom 22. März 1985

– Stand der Unterzeichnungen, Ratifizierung, Beitritte, Annahmen und Genehmigungen: 20. August 1990

Teilnehmer	Unterzeichnung	Ratifizierung Beitritt (B) Annahme (A) Genehmigung (G)
Ägypten . . . . .	22. 3. 85	9. 5. 88
Argentinien . . . . .	22. 3. 85	18. 1. 90
Australien . . . . .	—	26. 9. 87
Bahrain . . . . .	—	27. 4. 90 B
Bangladesch . . . . .	—	18. 5. 89
Belgien . . . . .	22. 3. 85	17. 10. 88
Burkina Faso . . . . .	22. 12. 85	30. 3. 89
Chile . . . . .	22. 3. 85	6. 3. 90
Dänemark . . . . .	22. 3. 85	29. 9. 88
DDR . . . . .	—	25. 1. 88
Bundesrepublik Deutschland . . . . .	22. 3. 85	30. 9. 88
Ecuador . . . . .	—	10. 4. 90
EWG . . . . .	22. 3. 85	17. 10. 88
Fidji . . . . .	—	28. 10. 89
Finnland . . . . .	22. 3. 85	26. 9. 88

noch Tabelle 1

Teilnehmer	Unterzeichnung	Ratifizierung Beitritt (B) Annahme (A) Genehmigung (G)
Brunai	—	26. 9. 90 A
Chad	—	18. 5. 89
Frankreich	22. 3. 85	4. 12. 87
Gambia	—	25. 7. 90 B
Ghana	—	24. 7. 89
Griechenland	22. 3. 85	29. 12. 88
Guatemala	—	11. 9. 87
Island	—	29. 8. 89
Irland	—	15. 9. 88 B
Italien	22. 3. 85	19. 9. 86
Japan	—	30. 9. 88 B
Jordanien	—	31. 5. 89 B
Kamerun	—	30. 8. 89
Kanada	22. 3. 85	4. 6. 86
Kenia	—	9. 11. 88 B
Liechtenstein	—	8. 2. 89
Luxemburg	17. 4. 86	17. 10. 88
Malaysia	—	29. 8. 89 B
Malediven	—	26. 4. 88
Malta	—	15. 9. 88
Marokko	7. 2. 86	—
Mexiko	1. 4. 85	14. 9. 87
Neuseeland	21. 3. 86	2. 6. 88
Niederlande	22. 3. 85	19. 9. 89 A
Nigeria	—	31. 10. 88 B
Norwegen	22. 3. 85	23. 9. 86
Österreich	16. 9. 85	19. 8. 87
Panama	—	13. 2. 89 B
Polen	—	13. 7. 90 B
Portugal	—	17. 10. 88 B
Sambia	—	24. 1. 90 B
Schweden	22. 3. 85	26. 11. 86
Schweiz	22. 3. 85	17. 12. 87
Singapur	—	5. 1. 89 B
Spanien	—	25. 7. 88 B
Sri Lanka	—	15. 12. 89 B
Südafrika	—	15. 1. 90 B
Syrien	—	12. 12. 89 B
Thailand	—	7. 7. 89 B
Trinidad und Tobago	—	28. 8. 89 B
Tunesien	—	25. 9. 89 B
Uganda	—	24. 6. 88 B
Ukraine	22. 3. 85	18. 6. 86 A
Ungarn	—	4. 5. 88 B
UdSSR	22. 3. 85	18. 6. 86 A
USA	22. 3. 85	27. 8. 86
Venezuela	—	1. 9. 88 B
Vereinigte Arab. Emirate	—	22. 12. 89 B
Vereinigtes Königreich	22. 3. 85	20. 6. 86 A
Weißrußland	—	—
Brasilien	—	19. 5. 90
VR China	—	11. 9. 89 A
Kolumbien	—	11. 7. 90 B
Lybien	—	11. 9. 90 B
Peru	22. 3. 85	7. 4. 89
Uruguay	—	27. 2. 89 B

### 1.1.2 Montrealer Protokoll über Stoffe, die zu einem Abbau der Ozonschicht führen\*)

Das Montrealer Protokoll (1) ist die erste Folgevereinbarung zum Wiener Übereinkommen und wurde am

\*) Dieses Kapitel bezieht sich auf die Ersterfassung des Montrealer Protokolls. Auf der zweiten Vertragsstaatenkonferenz im Juni 1990 in London wurden die Protokollregelungen verschärft (vgl. Nr. 1.1.1.3)

16. September 1987 von vierundzwanzig Staaten und den Europäischen Gemeinschaften unterzeichnet. Durch die Ratifikation von elf Parteien, die zusammen mindestens zwei Drittel des Weltverbrauchs der im Protokoll geregelten Stoffe repräsentieren, ist es am 1. Januar 1989 in Kraft getreten. Nach Stand vom 20. August 1990 ist das Montrealer Protokoll von 46 Staaten gezeichnet und von 62 Staaten ratifiziert worden (vgl. Tabelle 2). Die bisherigen Vertragsstaaten repräsentieren insgesamt nahezu 90 Prozent des Verbrauchs der geregelten Stoffe.

Tabelle 2

#### Montrealer Protokoll vom 16. September 1987 über Stoffe, die zu einem Abbau der Ozonschicht führen

– Stand der Unterzeichnungen, Ratifikationen, Beitritte, Annahmen und Genehmigungen:  
20. August 1990

Teilnehmer	Unterzeichnung	Ratifizierung Beitritt (B) Annahme (A) Genehmigung (G)
Ägypten .....	16. 9. 87	2. 8. 88
Argentinien .....	29. 6. 88	—
Australien .....	8. 6. 88	19. 5. 89
Bahrain .....	—	27. 4. 90 B
Bangladesch .....	—	2. 8. 90 B
Belgien .....	16. 9. 87	30. 12. 88
Burkina Faso .....	14. 9. 88	20. 7. 89
Chile .....	14. 6. 88	26. 3. 90
Dänemark .....	16. 9. 87	16. 12. 88
DDR .....	—	25. 1. 89 B
Bundesrepublik Deutschland .....	16. 9. 87	16. 12. 88
Ecuador .....	—	30. 4. 90 B
EWG .....	16. 9. 87	16. 12. 88 G
Fidji .....	—	23. 10. 89 B
Finnland .....	16. 9. 87	23. 12. 88 A
Frankreich .....	16. 9. 87	28. 12. 88 G
Gambia .....	—	25. 7. 90 B
Ghana .....	16. 9. 87	24. 7. 89
Griechenland .....	29. 10. 87	16. 12. 88
Guatemala .....	—	7. 11. 89 B
Island .....	—	29. 8. 89 B
Israel .....	14. 1. 88	—
Indonesien .....	21. 7. 88	—
Irland .....	15. 9. 88	16. 12. 88
Italien .....	16. 9. 87	16. 12. 88
Japan .....	16. 9. 87	30. 9. 88 A
Jordanien .....	—	31. 5. 89 B
Kamerun .....	—	30. 8. 89 B
Kanada .....	16. 9. 87	30. 6. 88
Kenia .....	16. 9. 87	9. 11. 88
Kongo .....	15. 9. 88	8. 2. 89 B
Liechtenstein .....	—	8. 2. 89 B
Luxemburg .....	29. 1. 88	17. 10. 88
Malaysia .....	—	29. 8. 89 B
Malediven .....	12. 7. 88	16. 5. 89
Malta .....	15. 9. 88	29. 12. 88
Marokko .....	7. 1. 88	—
Mexiko .....	16. 9. 87	31. 3. 88
Neuseeland .....	16. 9. 87	21. 7. 88
Niederlande .....	16. 9. 87	16. 12. 88

noch Tabelle 2

Teilnehmer	Unterzeichnung	Ratifizierung Beitritt (B) Annahme (A) Genehmigung (G)
Nigeria	—	31. 10. 88
Norwegen	16. 9. 87	24. 6. 88
Österreich	29. 8. 88	3. 5. 89
Panama	16. 9. 87	3. 3. 89
Philippinen	14. 9. 88	—
Polen	—	13. 7. 90 B
Portugal	16. 9. 87	17. 10. 88
Sambia	—	24. 1. 90 B
Schweden	16. 9. 87	29. 6. 88
Schweiz	16. 9. 87	28. 12. 88
Senegal	16. 9. 87	—
Singapur	—	5. 1. 89 B
Spanien	21. 7. 88	16. 12. 88
Sri Lanka	—	15. 12. 89 B
Südafrika	—	15. 1. 90 B
Syrien	—	12. 12. 89 B
Thailand	15. 9. 88	7. 7. 89
Togo	16. 9. 87	—
Trinidad und Tobago	—	28. 8. 89 B
Tunesien	—	25. 9. 89 B
Uganda	15. 9. 88	15. 9. 88
Ukraine	18. 2. 88	20. 9. 88 A
Ungarn	—	20. 4. 89 B
UdSSR	29. 12. 87	10. 11. 88
USA	16. 9. 87	21. 4. 88
Venezuela	16. 9. 87	6. 2. 89
Vereinigte Arab. Emirate	—	22. 12. 89 B
Vereinigtes Königreich	16. 9. 87	16. 12. 88
Weißrußland	22. 1. 88	31. 10. 88

Das Montrealer Protokoll sieht Regelungen für acht Stoffe vor, die in zwei Gruppen eingeteilt sind und für die zum Teil unterschiedliche Regelungen gelten. Gruppe 1 enthält die vollhalogenierten FCKW 11, 12, 113, 114 und 115; Gruppe 2 umfaßt die Halone 1211, 1301 und 2402. Andere ozonschädliche Substanzen wie Tetrachlorkohlenstoff, Methylchloroform und teilhalogenierte FCKW werden erst seit der Verschärfung des Protokolls geregelt (vgl. Nr. 1.1.3).

In den Bestimmungen des Protokolls werden sowohl die FCKW und Halone selbst als auch Produkte, die diese Verbindungen enthalten oder mit ihnen hergestellt wurden, erfaßt. Die Regelungen beziehen sich auf Produktion, Verbrauch<sup>1)</sup> sowie auf Export und Import. Für die FCKW der ersten Gruppe wurde folgender Reduzierungsplan festgelegt (vgl. Tabelle 3):

- Im Zeitraum vom 1. Juli 1989 bis zum 30. Juni 1990 müssen die Produktion und der Verbrauch auf die Mengen des Jahres 1986 reduziert werden. Anschließend sind diese Jahresmengen bis zur nächsten Reduktionsstufe beizubehalten.

<sup>1)</sup> Der Verbrauch ist definiert als Produktionsmenge zuzüglich der Importe und abzüglich der Exporte und der Mengen, die nach einem von den Vertragsparteien gebilligten Verfahren zerstört wurde.

- Im Zeitraum zwischen dem 1. Juli 1993 und dem 30. Juni 1994 müssen die Produktion und der Verbrauch dieser Stoffe gegenüber den Mengen des Jahres 1986 um 20 Prozent verringert werden. Diese Mengen dürfen in den darauffolgenden Jahren bis zur nächsten Reduktionsstufe nicht überschritten werden.
- Im Zeitraum vom 1. Juli 1998 bis zum 30. Juni 1999 müssen die Produktion und der Verbrauch dieser Stoffe um weitere 30 Prozent reduziert werden, das sind 50 Prozent Reduktion gegenüber 1986. Werden von den Vertragsparteien nicht mit zwei Drittel Mehrheit, die mindestens zwei Drittel des Verbrauches der in Gruppe 1 geregelten Stoffe repräsentieren, andere Vereinbarungen getroffen, ist dieses Niveau beizubehalten.

Die Regelung für die Halone (Gruppe 2) sieht lediglich vor, die Produktion und den Verbrauch im Zeitraum vom 1. Januar bis 31. Dezember 1992 auf das Niveau des Jahres 1986 zu reduzieren und dieses Niveau in den Folgejahren beizubehalten.

Die genannten Reduktionsquoten beziehen sich jeweils auf eine gesamte Stoffgruppe und nicht auf eine bestimmte FCKW- oder Halon-Verbindung. Die Stoffe weisen jedoch unterschiedliche Ozonerstörungs-

tentiale auf und werden daher mit einem im Protokoll festgelegten Gewichtungsfaktor auf ein vergleichbares Niveau umgerechnet.

Zusätzlich wird der Handel mit den geregelten Stoffe mit Nicht-Vertragsstaaten eingeschränkt. Während der Import aus diesen Staaten innerhalb eines Jahres nach Inkrafttreten des Protokolls verboten wird, ist der Export der Vertragsparteien in solche Länder zumindest bis zum 31. Dezember 1992 uneingeschränkt gestattet.

#### — Verpflichtungen der Vertragsparteien

Das Protokoll sieht unter anderem die Verpflichtung der Vertragsparteien vor, den Entwicklungsländern den Zugang zu umweltverträglichen Ersatzstoffen und -technologien zu erleichtern und sie beim möglichst raschen Einsatz dieser Substitute und Technologien zu unterstützen. Zur Verwirklichung dieser Vorgaben ist die Bereitstellung von Subventionen, Hilfen, Krediten und Garantien vorgesehen. Hinzu kommt die Pflicht zum Informationsaustausch, zur Forschungsförderung und zur technischen Unterstützung.

#### — Ausnahmeregelungen

Neben den dargestellten Vorschriften sieht das Protokoll Ausnahmen bei den Produktionsobergrenzen und für den Bestandsschutz sowie insbesondere für Entwicklungsländer vor:

- Die Produktionsmengen der geregelten Substanzen dürfen um 10 Prozent, in der letzten Stufe bei FCKW um 15 Prozent überschritten werden, wenn damit die Deckung innerstaatlicher Bedürfnisse von Entwicklungsländern oder die industrielle Rationalisierung zwischen Vertragsparteien bezweckt wird.
- Die für die Reduktionsberechnung festgelegte Produktionsmenge des Jahres 1986 kann erhöht werden, wenn vor Unterzeichnung des Protokolls mit dem Bau von Produktionsanlagen begonnen wurde und diese bis zum 31. Dezember 1990 fertiggestellt werden.
- Entwicklungsländer können zur Deckung ihrer grundlegenden nationalen Bedürfnisse die vorgeschriebenen Regelungen zehn Jahre später umsetzen, wenn der jährliche Verbrauch der geregelten Stoffe zu irgendeiner Zeit nach Inkrafttreten des Protokolls innerhalb eines Zeitraumes von zehn Jahren weniger als 0,3 Kilogramm pro Kopf der Bevölkerung beträgt.

Für Produkte, die mit geregelten Stoffen hergestellt wurden oder diese enthalten, ist lediglich die Verpflichtung vorgesehen, innerhalb von drei beziehungsweise fünf Jahren nach Inkrafttreten Regelungen über Importverbote und -beschränkungen zu treffen (vgl. dazu im einzelnen 1. Bericht, Abschnitt C, Kapitel 3, Nr. 3.3, Nr. 3.4 und (2)).

#### — Einschätzung des Montrealer Protokolls

Das Montrealer Protokoll ist unbestritten ein überaus wichtiger erster Schritt zum Schutz der Ozonschicht,

mit dem es erstmals gelungen ist, auf internationaler Ebene verbindliche Umweltschutzmaßnahmen festzulegen. Mit Deutlichkeit muß jedoch hervorgehoben werden, daß die festgelegten Regelungen, und dies betrifft sowohl die Reduktionsquoten als auch den Kreis der geregelten Stoffe, bei weitem keine ausreichenden Maßnahmen darstellten.

Die weitere Entwicklung der Konzentrationen ozonzerstörender Substanzen in der Atmosphäre ist abhängig von

- der Anzahl der Staaten, die dem Protokoll beitreten, und deren Produktionskapazität;
- dem Grad der Erfüllung der vereinbarten Regelungen;
- dem Grad der Produktionsverlagerung in Nicht-Unterzeichnerländer;
- dem Ausmaß, in dem Ausnahmeregelungen genutzt werden, und
- den Emissionsmengen der bisher nicht im Protokoll genannten ozonschädlichen Substanzen.

Mit Hilfe von Rechenmodellen kann die Effektivität des Montrealer Protokolls sowie darüber hinausgehender Maßnahmen abgeschätzt werden (vgl. 3. Kap.; sowie 1. Bericht, Abschnitt C, 4. Kap. 1.). Die verschiedenen Szenarien kommen zu dem einheitlichen Ergebnis, daß die Regelungen des Montrealer Protokolls für einen wirksamen Schutz der Ozonschicht ungenügend waren. Dieser Schlußfolgerung, zu der die Enquete-Kommission bereits in ihrem ersten Bericht gelangte, haben sich mittlerweile nahezu alle Vertragsstaaten angeschlossen.

Die Enquete-Kommission war daher in ihrem im Herbst 1988 vorgelegten ersten Bericht der Auffassung, daß Produktion und Verbrauch ozonschädlicher Stoffe weltweit bis zum Jahr 2000 um mindestens 95 Prozent reduziert werden müssen (vgl. Nr. 3.1 und Abb. 1). Dies führte zu der Forderung, daß das Montrealer Protokoll im Rahmen der im Jahr 1990 vorgesehenen Überprüfung einer erheblichen Überarbeitung und Fortschreibung unterzogen werden und die Bundesregierung sich in den Verhandlungen für die Revision des Protokolls für eine drastische Verschärfung einsetzen sollte. Neben der Forderung des weltweiten Ausstieges aus Produktion und Verbrauch der FCKW bis zum Jahr 2000 sah es die Enquete-Kommission als notwendig an, daß die Bundesregierung im Rahmen der Verhandlungen mit allem Nachdruck eine Reihe von Maßnahmen zum Schutz der Ozonschicht verfolgt (vgl. Nr. 3.1).

Sowohl in den EG-Verhandlungen zur Vorbereitung der ersten und zweiten Vertragsstaatenkonferenz zum Montrealer Protokoll, in denen sich der Umweltministerrat schließlich auf eine gemeinschaftliche Verhandlungsposition geeinigt hat, als auch in den UNEP-Konferenzen und Arbeitsgruppensitzungen zur Verschärfung des Protokolls sowie auf der zweiten Vertragsstaatenkonferenz hat sich die Delegation der Bundesrepublik Deutschland nachdrücklich für eine weitreichende Verschärfung der Regelungen entsprechend den Beschlüssen des Deutschen Bundestages eingesetzt (vgl. dazu im einzelnen Nr. 3.1 und

Nr. 3.2.1). Durch die vom Deutschen Bundestag beschlossene drastische FCKW-Reduzierung und die Vorlage einer nationalen FCKW-Verbotsverordnung wurde die deutsche Verhandlungsposition auf internationaler Ebene glaubwürdiger und gestärkt.

### 1.1.3 Verschärfung des Montrealer Protokolls

Das Montrealer Protokoll sieht eine ständige Überprüfung der darin enthaltenen Regelungen durch die Vertragsparteien vor. Das Protokoll ist nicht als starre Konvention konzipiert, sondern vielmehr als Grundlage für einen kontinuierlichen Prozeß, der von weiteren Beobachtungen der Ozonzerstörung sowie Entwicklungen im Bereich der Ersatzstoffe und -technologien mitbestimmt wird. Ab 1990 und danach alle vier Jahre können die vorgesehenen Maßnahmen auf der Grundlage verfügbarer umweltbezogener Informationen aus Wissenschaft, Technik und Wirtschaft neu bewertet werden. Sollte zwischen den Vertragsparteien kein Konsens über Protokolländerungen bestehen, ist die Zustimmung durch zwei Drittel der anwesenden Parteien, die zusammen mindestens zwei Drittel des Weltverbrauchs repräsentieren, ausreichend.

#### — Erste Vertragsstaatenkonferenz zum Montrealer Protokoll in Helsinki

Die erste Vertragsstaatenkonferenz zum Montrealer Protokoll, an der 81 Staaten und die EG sowie 24 internationale Organisationen und Verbände teilnahmen, fand vom 2. bis 5. Mai 1989 in Helsinki statt. Auf der Tagung wurden folgende Inhalte erörtert:

- Überprüfung der FCKW- und Halonreduktionsquoten;
- Bestimmung der Aufgaben und Ziele der eingesetzten vier Arbeitsgruppen zu den Themen:
  - Wissenschaftliche Bewertung,
    - Umweltauswirkungen,
    - Technische Bestandsaufnahme und
    - Wirtschaftliche Bewertung;
- Maßnahmen bei Nichterfüllung der Vertragspflichten;
- Überprüfung des Protokollanhangs: mögliche Aufnahme weiterer ozonschädigender Stoffe, Richtigkeit des Ozonschädigungspotentials;
- Datenaustausch:
  - Berichtspflichten,
  - Vertraulichkeit;
- Konkretisierung verschiedener Protokollbegriffe.

Formelle Beschlüsse wurden zwar erst für die zweite Vertragsstaatenkonferenz im Juni 1990 vorgesehen, jedoch wurde in der einstimmig verabschiedeten „Erklärung von Helsinki“ die Notwendigkeit zum Ausdruck gebracht, die gegenwärtigen Regelungen des Protokolls zu verschärfen. Diese Erklärung wurde als

großer Fortschritt gewertet und hat im einzelnen folgenden Inhalt:

- Aufruf an alle Staaten, der Wiener Konvention zum Schutz der Ozonschicht und dem Montrealer Protokoll beizutreten, soweit noch nicht geschehen;
- Einvernehmen über die Beendigung von Produktion und Verbrauch der im Montrealer Protokoll geregelten FCKW baldmöglichst, aber nicht später als bis zum Jahr 2000;
- Verkürzung des Zeitplans;
- Besondere Berücksichtigung der Situation in den Entwicklungsländern;
- Beendigung der Produktion und des Verbrauchs von Halonen sowie Kontrolle und Reduktion anderer ozonschädlicher Stoffe sobald wie möglich;
- Verpflichtung zur beschleunigten Entwicklung umweltverträglicher Ersatzstoffe beziehungsweise -technologien;
- Zugang der Entwicklungsländer zu wissenschaftlichen Informationen und Forschungsergebnissen sowie Maßnahmen zur Verbesserung der Ausbildung;
- Entwicklung angemessener Finanzierungsmaßnahmen, die den Technologietransfer und den Ersatz von Maschinen und Anlagen zu geringen Kosten für Entwicklungsländer ermöglichen.

Nach dieser Erklärung konnte man davon ausgehen, daß auf der zweiten Vertragsstaatenkonferenz im Juni 1990 eine deutliche Verschärfung der Protokollregelungen erfolgen werde. Als wichtigste Vertragsänderung wurde die Aufnahme zusätzlicher Substanzen in die Liste der geregelten Stoffe sowie die Einstellung von Produktion und Verbrauch der FCKW und eventuell der Halone zu einem noch festzulegenden Zeitpunkt vorgesehen.

Weiterer Schwerpunkt der Helsinki-Konferenz war die Entwicklung technischer und finanzieller Maßnahmen zur Unterstützung der Entwicklungsländer. Zur Lösung dieses Problems wurde eine Arbeitsgruppe eingesetzt, die klären sollte, in welcher Form die im Protokoll vorgeschriebenen Verpflichtungen der Vertragsparteien am sinnvollsten zu erfüllen seien.

Hierbei war insbesondere die Möglichkeit eines internationalen Finanzierungsverfahrens und die Einrichtung eines internationalen Fonds dringend zu prüfen.

Keine Einigung gab es auf der Helsinki-Konferenz über die Form und das Ausmaß, in dem die Industriestaaten den Ländern der Dritten Welt bei der Kompensierung der wirtschaftlichen Verluste helfen können. Während die Entwicklungsländer für die Einrichtung des vom UNEP-Direktor Mostafa Tolba vorgeschlagenen international verwalteten Klimafonds eintraten, sprachen sich wichtige westliche Industrieländer wie Japan, die USA und Großbritannien dagegen aus. Sie hielten an finanziellen Hilfen über bereits existierende Kanäle wie Weltbank oder bilaterale Vereinbarungen fest. Die Europäischen Gemeinschaften erklärten sich hingegen bereit, über die Möglichkeit

eines Fonds zu verhandeln. Vor allem Norwegen hatte sich während der Konferenz für den gemeinsamen Fonds eingesetzt und vorgeschlagen, daß jeder Industriestaat 0,1 Prozent seines Bruttosozialproduktes bereitstellen solle.

#### – UNEP-Konferenzen und Arbeitsgruppensitzungen

Zur Ausarbeitung der Änderungsvorschläge für die zweite Vertragsstaatenkonferenz wurden vier wissenschaftliche Arbeitsgruppen eingesetzt, die sich mit

- den naturwissenschaftlichen Grundlagen der Ozonveränderung,
- den Auswirkungen der Ozonabnahme,
- Technologiefragen und – wirtschaftlichen Aspekten

auseinandersetzen sollten.

Im Anschluß an das erste Arbeitsgruppentreffen vom 21. bis 25. August 1989 fand in Nairobi eine UNEP-Konferenz statt, die die Aufgabe hatte, Vorschläge zur zweiten Vertragsstaatenkonferenz zu unterbreiten. Die vorgelegten Vorschläge der Vertragsparteien waren jedoch noch so divergierend, daß eine weitere Zusammenkunft der Arbeitsgruppe im November vereinbart wurde. Erhebliche Schwierigkeiten bestanden unter anderem in der Schaffung eines geeigneten Instrumentariums zur Überwachung der Protokollvorschriften.

Vom 13. bis 17. November 1989 fand im Rahmen der UNEP-Konsultationen eine weitere Konferenz zur Änderung des Montrealer Protokolls statt. Eine generelle Einigung konnte während der Verhandlungen nicht erzielt werden. Insbesondere wurde die bereits im Mai 1989 beschlossene Einbindung der Entwicklungsländer wieder in Frage gestellt. Im einzelnen forderten die weitgehend als einheitlicher Block auftretenden Entwicklungsländer

- die grundsätzliche Möglichkeit, die dritte Regelstufe des Montrealer Protokolls nicht nur zur Deckung nationaler Bedürfnisse um zehn Jahre zu verschieben;
- eine Sonderkonferenz der Vertragsparteien im Jahr 1999, auf der die Notwendigkeit weiterer Reduktionen in den Entwicklungsländern geprüft werden sollte;
- eine Vereinbarung über die Pflicht der Industrieländer, den Transfer von Recycling-Techniken und Fertigungsanlagen zur Herstellung von Substituten für die im Protokoll geregelten Stoffe zu garantieren;
- die Einrichtung eines UNEP-Treuhandfonds unter genau spezifizierten Voraussetzungen, der zusätzlich anfallende Kosten in den Entwicklungsländern decken sollte.

Die industrialisierten Staaten verhielten sich gegenüber diesen Vorschlägen im wesentlichen reserviert. Die USA schlugen die Anfertigung von Länderstudien zur Feststellung der besonderen Bedürfnisse der Ent-

wicklungsländer sowie die Schaffung von Projekten und Programmen vor, um den Staaten der Dritten Welt die Vertragserfüllung zu erleichtern. Vorgesehen war hierbei technische und finanzielle Hilfe.

Einigkeit bestand hingegen bei allen Beteiligten im Ziel, Produktion und Verbrauch der geregelten FCKW bis zum Jahr 2000 einzustellen. Unterschiedliche Auffassungen gab es lediglich über die Reduktionsstufenstufen.

Auch die Reduktion der Halone wurde mittlerweile von allen Teilnehmerstaaten als notwendig angesehen. Umstritten war jedoch, welche Reduktionsquoten und welche Fristen festgelegt werden sollten. Während etwa Japan eine fünfzig prozentige Reduktion bis 1997 und die Vereinbarung einer Ausnahme-liste anstrebte, schlugen die USA eine fünfzig prozentige Reduktion bis 1995 und einen vollständigen Verbrauchsverzicht bis zum Jahr 2000 vor. Keine Einigung wurde über die Einbeziehung bisher nicht geregelter ozonschädlicher Verbindungen erzielt.

Auf der Arbeitsgruppensitzung vom 26. Februar bis zum 5. März 1990 in Genf konnte trotz deutlicher Fortschritte keine Einigung erzielt werden. Eine endgültige Vereinbarung noch vor der zweiten Konferenz der Vertragsstaaten im Juni wurde daher nicht mehr erwartet. Zur Unterstützung der Entwicklungsländer wurde ein Kompromißmodell diskutiert, das die Einrichtung eines Treuhandfonds in Kombination mit einem Mechanismus, der zusätzlich bilaterale und multilaterale Hilfe zuläßt, vorsieht.

#### – Tagung des EG-Umweltministerrats zur Überprüfung des Montrealer Protokolls

In der Ratstagung am 7. Juni 1990 im Luxemburg hat sich der Umweltministerrat unter anderem mit der Überprüfung des Montrealer Protokolls auseinandergesetzt. Die Mitglieder einigten sich auf eine gemeinschaftliche Verhandlungsposition für die zweite Vertragsstaatenkonferenz zum Montrealer Protokoll. Die festgelegten Vereinbarungen stellten gegenüber der bis dahin gültigen EG-Verhandlungsposition eine drastische Verschärfung dar.

Im einzelnen wurden folgende Regelungen des Protokolls als notwendig erachtet:

Verringerung von Produktion und Verbrauch von

- FCKW 11, 12, 113, 114, 115 um
  - 50 Prozent bis 1991/1992,
  - 85 Prozent bis 1995/1996,
  - 100 Prozent bis 1997 oder spätestens bis 2000;
- Halon 1301, 1211, 2402 um
  - 50 Prozent bis 1995/1996,
  - 100 Prozent bis 2000;
- Tetrachlorkohlenstoff um
  - 50 Prozent bis 1991/1992,
  - 85 Prozent bis 1995/1996,
  - 100 Prozent bis 2000;
- Methylchloroform um
  - 25 Prozent bis 1994 und
  - 50 Prozent bis 2000.

Zur Unterstützung der Entwicklungsländer sollte ein finanzieller Mechanismus geschaffen werden. Dieser sollte die noch zu definierenden Mehrkosten decken, die den Entwicklungsländern bei der Einhaltung der Protokollregelungen entstehen.

Darüber hinaus begrüßte der Rat den neuen EG-Verordnungsentwurf, der die geltende Verordnung 3322/88 zur Umsetzung des Montrealer Protokolls ersetzen soll. Dieser neue Entwurf sieht unter anderem die Produktions- und Verbrauchseinstellung innerhalb der EG bis zum Jahr 1997 vor (vgl. Nr. 2.3) und basiert im wesentlichen auf den Vorschlägen der Enquete-Kommission (vgl. Nr. 3.1).

#### – Zweite Vertragsstaatenkonferenz zum Montrealer Protokoll in London

Die zweite Vertragsstaatenkonferenz zum Montrealer Protokoll, an der 83 Staaten und die EG sowie 8 internationale Organisationen, Verbände, Körperschaften etc. und 33 Organisationen aus Wissenschaft, Wirtschaft und dem Naturschutz teilnahmen, fand vom 27. bis 29. Juni 1990 in London statt. Einige Nicht-Vertragsstaaten wie Indonesien, die VR China und Indien waren mit Beobachterstatus vertreten. Das nächste Treffen der Vertragsparteien soll vom 19. bis 21. Juni 1991 stattfinden.

Folgende Sachfragen wurden auf der zweiten Vertragsstaatenkonferenz erörtert:

- Neueste Forschungsergebnisse im Bereich Ozonabbau in der Stratosphäre;
- Verkürzung der Fristen für die Reduktion von FCKW- und Halonen;
- Einbeziehung weiterer ozonschädlicher Verbindungen;
- Festlegung der finanziellen und technischen Unterstützung für Entwicklungsländer;
- Erstellung von Länderstudien zur Unterstützung der Entwicklungsländer.

Als Ergebnis der Verhandlungen, denen eine sieben-tägige UNEP-Konferenz vorangegangen war, wurden folgende Beschlüsse gefaßt (vgl. Tabelle 3 und Abb. 1):

1. Verschärfung der Protokollregelungen über die bisher geregelten FCKW sowie Halone

Generell wurden die Reduktionszeiträume und -fristen um ein halbes Jahr – vom 1. Juli auf den 1. Januar – vorverlegt. Im einzelnen sind folgende FCKW- und Halon-Reduzierungen, die auf der Basis der Produktions- und Verbrauchszahlen des Jahres 1986 berechnet werden, vorgesehen:

- a. FCKW 11, 12, 113, 114, 115:

Einfrieren von Produktion und Verbrauch im Zeitraum – 1. Juli 1991 bis 31. Dezember 1992;

Reduktion von Produktion und Verbrauch ab

- 1. Januar 1993 um 20 Prozent,

- 1. Januar 1995 um 50 Prozent und
- 1. Januar 1997 um 85 Prozent – 1. Januar 2000 um 100 Prozent.

Im Jahr 1992 soll die Gesamtlage überprüft und gegebenenfalls eine Beschleunigung der Reduktion vorgesehen werden.

Die EG vertrat, gestützt auf den Beschluß des Umweltministerrates vom 7. Juni 1990, in den Verhandlungen die fortschrittlichste Haltung. Die Forderung der EG, Produktion und Verwendung der FCKW im Jahr 1997, aber nicht später als im Jahr 2000 einzustellen, wurde von Schweden, Norwegen und Finnland sowie von Kanada, Österreich, der Schweiz, Neuseeland und Australien unterstützt. Wegen des starken Widerstandes der USA, Japans und der UdSSR konnte sich dieser Reduzierungsplan jedoch nicht durchsetzen.

In einer gemeinsamen Erklärung der Regierungen von Australien, Belgien, Bundesrepublik Deutschland, Dänemark, Finnland, Kanada, Liechtenstein, Niederlande, Neuseeland, Norwegen, Österreich, Schweden und der Schweiz bekundeten die betreffenden Delegationsleiter ihre feste Entschlossenheit, alle Maßnahmen zu ergreifen, um Produktion und Verbrauch der fünf bisher geregelten FCKW so bald wie möglich zu beenden, jedoch nicht später als im Jahr 1997.

- b. Halon 1211, 1301 und 2402:

Einfrieren von Produktion und Verbrauch

- Ab 1. Januar 1992;

Reduktion von Produktion und Verbrauch ab

- 1. Januar 1995 um 50 Prozent und
- 1. Januar 2000 um 100 Prozent

In Anwendungsbereichen, in denen Halone unverzichtbar und nicht-substituierbar sind, ist der Einsatz weiterhin zugelassen. Eine Entscheidung der Vertragsparteien über Art und Umfang dieser Anwendungsbereiche ist jedoch erst für den 1. Januar 1993 vorgesehen.

2. Erweiterung der Stoffliste ozonschädlicher Substanzen

Dieser Beschluß bedarf einer erneuten Ratifizierung des Protokolls, dessen Inkrafttreten erst für den 1. Januar 1992 vorgesehen ist. Basisjahr für die Reduktionsstufen sind die Produktions- und Verbrauchszahlen im Jahr 1989.

- a. Andere vollhalogenierte FCKW

Neu in das Protokoll aufgenommen (Anhang B, Gruppe I), werden FCKW 13, 111, 112, 211, 212, 213, 214, 215, 216 und 217, die jeweils ein Ozonzerstörungspotential von etwa 1 haben. Für diese zusätzlich aufgenommenen zehn FCKW wurden folgende Reduzierungen festgelegt:

- Ab 1. Januar 1993 um 20 Prozent,
- ab 1. Januar 1997 um 85 Prozent,
- ab 1. Januar 2000 um 100 Prozent.



Tetrachlorkohlenstoff (CCl<sub>4</sub>) und Methylchloroform (CH<sub>3</sub>CCl<sub>3</sub>) werden ebenfalls neu in das Protokoll aufgenommen und wie folgt reduziert:

b. CCl<sub>4</sub>

- Ab 1. Januar 1993 um 50 Prozent,
- ab 1. Januar 1995 um 85 Prozent,
- ab 1. Januar 2000 um 100 Prozent.

c. CH<sub>3</sub>CCl<sub>3</sub>

- Ab 1. Januar 1993 einfrieren von Verbrauch und Produktion,
- ab 1. Januar 1995 um 30 Prozent,
- ab 1. Januar 2000 um 50 Prozent,
- ab 1. Januar 2005 um 100 Prozent.

Gemäß einem Vorschlag der Regierungen und der Europäischen Gemeinschaften wird dem Protokoll zusätzlich ein neuer Anhang C mit der Kategorie „Übergangsstoffe“ angefügt, der insgesamt 33 Stoffe – darunter H-FCKW 22 – enthält. Im Protokoll bestehen nunmehr auch für die teilhalogenierten FCKW Berichterstattungspflichten. Diese Entschliebung, die kein formeller Beschluß zur Ergänzung des Protokolls ist, sieht vor, nicht später als im Jahr 2040, möglichst aber schon im Jahr 2020, eine Überprüfung der Verwendung dieser Übergangsstoffe vorzunehmen. Hierbei soll der Beitrag teilhalogenerter FCKW zur Ozonzerstörung und zum Treibhauseffekt bewertet sowie die Verfügbarkeit von Ersatzstoffen und -technologien berücksichtigt werden.

3. Ausnahmen für alle Stoffe

a. Produktionsobergrenzen

Die Obergrenzen für die Produktion sämtlicher Stoffe dürfen auf allen Stufen der Zeitpläne um bis zu 10 Prozent – auf der jeweils letzten Stufe bis zu 15 Prozent – überschritten werden, um die grundlegenden Bedürfnisse der Entwicklungsländer zu decken.

b. Pflichten der Entwicklungsländer

Entwicklungsländer, deren Jahresverbrauch an den bisher schon geregelten FCKW und Halonen weniger als 0,3 kg pro Kopf der Bevölkerung beträgt, müssen die oben genannten Maßnahmen jeweils erst zehn Jahre später durchführen. Bis zum Beginn der Maßnahmen gilt eine Obergrenze des Verbrauchs

- der bisher schon geregelten FCKW und Halone von 0,3 kg pro Kopf der Bevölkerung und
- der anderen vollhalogenierten FCKW, von Tetrachlorkohlenstoff und Methylchloroform von 0,2 kg pro Kopf der Bevölkerung.

4. Finanzielle und technische Unterstützung für Entwicklungsländer

Auf der Konferenz wurde beschlossen, vom 1. Januar 1991 bis zum 31. Dezember 1993 einen vorläufigen Finanzierungsmechanismus zur Unter-

stützung der Entwicklungsländer einzurichten. Durch finanzielle und technische Kooperation, darunter auch Technologietransfer, soll den Entwicklungsländern die Erfüllung der Protokoll-Vertragspflichten ermöglicht werden.

a. Finanzhilfe durch Errichtung eines multilateralen Fonds

Der Fonds soll Mehrkosten ersetzen, die den Entwicklungsländern durch die Einhaltung der Protokollregelungen entstehen. Über Berechtigung und Umfang der zusätzlichen Kosten sollen die Vertragsparteien entscheiden.

Das Finanzvolumen des Fonds, für den zunächst ein Zeitraum von drei Jahren vorgesehen wurde, beträgt 160 Millionen US-Dollar. Dieser Betrag wird um je 40 Millionen US-Dollar erhöht, wenn Indien und China dem Protokoll beitreten, so daß ein Gesamtvolumen von 240 Millionen US-Dollar festgelegt ist. Der Fonds soll der Entscheidungsmacht der Vertragsparteien unterstehen.

Die Vertragsstaaten haben zur Gründung des Fonds ein Exekutivkomitee eingesetzt, das die Aufgabe hat,

- eine Finanzierungsregelung und eine Satzung zu erstellen,
- die Fondsverwaltung zu überwachen und zu steuern,
- die Ausgaben zu überprüfen und zu überwachen sowie
- alle Projekte mit mehr als 250 000 US-Dollar Gesamtvolumen zu genehmigen.

Das Exekutivkomitee wird paritätisch besetzt mit je sieben Mitgliedern aus Entwicklungsländern (Ägypten, Brasilien, Ghana, Jordanien, Malaysia, Mexiko, Venezuela) und Industrieländern (Bundesrepublik Deutschland, Finnland, Japan, Kanada, Niederlande, UdSSR, USA).

Die Finanzierung des Fonds erfolgt entsprechend dem UN-Beitragsschlüssel, so daß auf die Bundesrepublik Deutschland etwa 9,2 Prozent entfallen.

Auf der Tagung wurde festgelegt, daß der Vorsitzende der Konferenz den Generalsekretär der UNO mit der Gründung des Fonds beauftragt. Der Beschluß über die Verwaltung des Fonds sieht eine Einladung an die Weltbank vor, mit dem Exekutivkomitee zusammenzuarbeiten. Nimmt die Weltbank diese Aufgabe an, wird der Präsident der Weltbank als Verwalter des Finanzierungsprogrammes eingesetzt. Diese Entscheidung konnte den Konflikt lösen zwischen der Mehrzahl der Entwicklungsländer und dem Exekutivdirektor von UNEP einerseits, die die Verwaltung des Fonds vorrangig den begünstigten Ländern überlassen wollten, und den Industriestaaten andererseits, die eine starke Anbindung der Fondsverwaltung an die Weltbank anstrebten.

## b. Technologietransfer

Der Technologietransfer, der den Entwicklungsländern die kostengünstige Einführung FCKW-freier Produkte und Technologien ermöglicht, soll durch folgende in das Protokoll neu aufgenommene Vorschrift gewährleistet werden:

Jede Vertragspartei soll alles in ihren Kräften stehende tun, um im Rahmen des Programms der finanziellen Unterstützung der Entwicklungsländer sicherzustellen, daß

- die besten aller verfügbaren umweltverträglichen Ersatzstoffe und -technologien unmittelbar den Entwicklungsländern im Sinne von Artikel 5 Absatz 1 des Protokolls überstellt werden und
- diese Überstellung zu annehmbaren und möglichst günstigen Bedingungen erfolgt.

## 5. Budget für die Jahre 1991 und 1992

Die Vertragsstaaten haben für die Finanzierung der Kosten, die dem Sekretariat der UNEP bei der Umsetzung der Wiener Konvention zum Schutz der Ozonschicht sowie des Montrealer Protokolls entstehen, das System eines rollierenden Zwei-Jahres-Haushaltes beschlossen. Vorgesehen sind im Jahr

- 1990: 3,4 Millionen US-Dollar,
- 1991: 2,423 Millionen US-Dollar und
- 1992: 2,225 Millionen US-Dollar.

– **Einschätzung der Ergebnisse der zweiten Vertragsstaatenkonferenz**

Die auf der zweiten Vertragsstaatenkonferenz in London beschlossene Verschärfung des Montrealer Protokolls stellt einen qualitativ erheblichen Fortschritt in der Sache dar. Während das Montrealer Protokoll einen ersten wichtigen Schritt hin zu konkreten Reduktionsvereinbarungen und zur Schaffung eines Instrumentariums darstellte, der jedoch in keiner Weise geeignet war, einen ausreichenden Beitrag zum Schutz der Ozonschicht und zur Eindämmung des zusätzlichen Treibhauseffektes zu liefern, ist dies im Rahmen der Vereinbarungen auf der zweiten Vertragsstaatenkonferenz zu einem großen Teil gelungen. Die von der Enquete-Kommission als sachlich notwendig angesehene weltweite Produktions- und Verbrauchseinstellung der FCKW bis spätestens zum Jahr 2000, wurde in bezug auf die vollhalogenierten FCKW erreicht. Ein entsprechender Ausstieg bis zum Jahr 2000 wurde für alle weiteren bisher nicht geregelten FCKW sowie für Halone und Tetrachlorkohlenstoff vorgesehen. Auch für Methylchloroform wurde eine akzeptable Festlegung gefunden (vgl. Tab. 3).

Begrüßenswert ist vor allem, daß ein Fonds zur finanziellen und technischen Unterstützung der Entwicklungsländer errichtet wurde und daß Indien und die VR China, die ein sehr großes FCKW-Verwendungspotential haben, — unter der Voraussetzung einer ausreichenden finanziellen Unterstützung durch die Industrieländer — ihre Bereitschaft, der Wiener Kon-

vention und dem Montrealer Protokoll beizutreten, erklärt haben.

Bedauerlich war, daß

- sich die weitergehenden Vorschläge der EG, der skandinavischen und einiger anderer Staaten noch nicht umsetzen ließen,
- noch keine verbindliche und hinreichende Regelung für teilhalogenierte FCKW vereinbart werden konnte und
- die Regelungen zur finanziellen und technischen Unterstützung der Entwicklungsländer noch nicht so weitreichend waren, daß auf die Ausnahmeregelungen zugunsten der Entwicklungsländer verzichtet werden konnte, so daß es noch bis zum Jahr 2010 möglich bleibt, bis zu 15 Prozent der Produktion und des Verbrauchs in und für Entwicklungsländer fortzuführen.

Da die erhebliche Verschärfung der Reduktionsverpflichtungen in einigen Ländern auf nationaler Ebene und die Verschärfung des Montrealer Protokolls sowie die im Vorfeld dazu geführte Diskussion zu verstärkten Anstrengungen von industrieller Seite bei der Entwicklung und dem Einsatz von Ersatzstoffen und -technologien geführt haben, erscheint es möglich, daß 1992 eine weitere Vorverlegung der nunmehr festgelegten Ausstiegsfristen um drei Jahre möglich wird. Die Enquete-Kommission sieht es sowohl unter dem Aspekt eines verstärkten Schutzes der Ozonschicht aber auch unter dem Aspekt, daß damit bis 1997 eine 20 prozentige Reduktion der insgesamt zum zusätzlichen Treibhauseffekt beitragenden Spurengasemissionen erreicht werden kann, als dringend notwendig an, daß diese Vorverlegung der Fristen auf der Basis der dann erreichten und erkennbaren weiteren Entwicklung im Jahr 1992 beschlossen wird. Des weiteren ist es nach Auffassung der Enquete-Kommission dringend notwendig, eine Regelung für teilhalogenierte FCKW zu treffen. Eine Einstellung der Produktion und des Verbrauchs sollte weltweit bis spätestens zum Jahr 2005 erfolgen.

Wünschenswert wäre außerdem, daß der vereinbarte Fonds ausgeweitet wird und ausreichende finanzielle Mittel zur Unterstützung der Entwicklungsländer bereitgestellt werden. Dadurch sollen gleichzeitig die Ausnahmeregelungen für Entwicklungsländer entfallen. Zur Mittlerweiterung bietet sich die Einführung einer Abgabe für die Herstellung und den Verbrauch ozonschädigender Stoffe an. Dadurch würden einerseits die benötigten Mittel zur Verfügung stehen und andererseits ein Anreiz zum schnelleren Ausstieg aus Produktion und Verbrauch ozonschädlicher Stoffe geschaffen werden.

Um diese Ziele zu beschleunigen und gleichzeitig die finanzielle Grundlage für die Entwicklungsländer zu möglichst schnellem Ausstieg aus Produktion und Verbrauch der FCKW zu schaffen sowie erste finanzielle Grundlagen für weitere Bemühungen zur Eindämmung des Treibhauseffektes auch in anderen Bereichen zu schaffen, empfiehlt die Enquete-Kommission die Vereinbarung einer Abgabe auf jedes Kilogramm FCKW und Halon in Höhe von 10,— DM und auf jedes Kilogramm teilhalogenierter H-FCKW in Höhe von 5,— DM (vgl. Nr. 5).

**Regelungen des Montrealer Protokolls sowie der verschärften Fassung entsprechend dem Beschluß  
der 2. Vertragsstaatenkonferenz vom 27. bis 29. Juni 1990 in London**

Substanz	Erstfassung des Montrealer Protokolls	Verschärfung des Montrealer Protokolls
FCKW 11, 12, 113, 114, 115	1990: Einfrieren auf Stand von 1986 1994: 20 % Reduktion 1999: 50 % Reduktion	1. 7. 91–31. 12. 92: Einfrieren auf Stand von 1986 1993: 20 % Reduktion 1995: 50 % Reduktion 1997: 85 % Reduktion 2000: 100 % Reduktion
FCKW *) 13, 111, 112, 211, 212, 213, 214, 215, 216 und 217	keine Regelung	ab 1. 1. 92: Einfrieren auf Stand von 1989 1993: 20 % Reduktion 1997: 85 % Reduktion 2000: 100 % Reduktion
Halone 1211, 1301, 2402	1992: Einfrieren auf Stand von 1986	1992: Einfrieren auf Stand von 1986 1995: 50 % Reduktion 2000: 100 % Reduktion
Tetrachlorkohlenstoff (CCl <sub>4</sub> ) *)	keine Regelung	1993: 50 % Reduktion 1995: 85 % Reduktion 2000: 100 % Reduktion
Methylchloroform *) (CH <sub>3</sub> CCl <sub>3</sub> )	keine Regelung	1993: Einfrieren auf Stand von 1989 1995: 30 % Reduktion 2000: 50 % Reduktion 2005: 100 % Reduktion
teihalogenierte Stoffe	keine Regelung	keine verbindliche Regelung
andere Halone	keine Regelung	keine verbindliche Regelung

\*) Basisjahr für die Reduktionsstufen sind die Produktions- und Verbrauchszahlen im Jahr 1989.

Die Ausweitung der finanziellen Mittel und der technischen Unterstützung und die Beseitigung der Ausnahmetatbestände für die Entwicklungsländer sollte ebenfalls im Rahmen einer Vertragskonferenz 1992 – unter Berücksichtigung der dann beabsichtigten Übereinkommen in anderen Regelungsbereichen der Eindämmung des Treibhauseffektes – vereinbart werden.

## 1.2 Internationale Konferenzen

Auf einer Reihe internationaler Konferenzen wurde die Erwartung zum Ausdruck gebracht, daß die Zerstörung der Ozonschicht große Gefahren mit sich bringen werde, und es wurde als notwendig bezeichnet, drastische Maßnahmen zu ergreifen. Die Ergebnisse dieser Treffen waren vor allem im Hinblick auf die notwendige Verschärfung des Montrealer Protokolls von großer Bedeutung.

### – Konferenz über globale Erwärmung und Klimaänderungen in Neu Delhi

Die Konferenz über „Global warming and climate change“ im Februar 1989 in Neu-Delhi befaßte sich

speziell mit den globalen Umweltgefahren aus der Perspektive der Entwicklungsländer. In der Schlußklärung wurde unter anderem die vollständige Einstellung von Produktion und Verbrauch der FCKW gefordert. Es wurde festgestellt, daß die erste und bedeutendste Reaktion auf die Herausforderung des zusätzlichen Treibhauseffektes und der Ozonerstörung von den Industrieländern ausgehen müsse. Diese hätten die größte Verantwortung bei der Reduzierung der FCKW und beim Einsatz größerer wirtschaftlicher, technologischer und politischer Ressourcen zu diesem Zweck. Ferner wurde erklärt, daß die Industriestaaten bisher den weitaus größten Teil der Emissionen verursacht hätten, daß sie die notwendigen Ressourcen besäßen und deshalb eine besondere Verpflichtung hätten, die Entwicklungsländer bei der Suche und Finanzierung geeigneter Gegenmaßnahmen zu unterstützen (vgl. dazu im einzelnen auch Abschnitt F, 1. Kap.).

### – Internationale Konferenz zur Rettung der Ozonschicht in London

Vom 5. bis 7. März 1989 fand unter der Schirmherrschaft der britischen Premierministerin Margaret Thatcher in Zusammenarbeit mit dem Umweltpro-

gramm der Vereinten Nationen (UNEP) eine Internationale Konferenz zur Rettung der Ozonschicht in London statt. Die Tagung, an der 123 Staaten teilnahmen, wurde von der Öffentlichkeit — auch im Hinblick auf die einen Monat später stattfindende erste Vertragsstaatenkonferenz zum Montrealer Protokoll — sehr aufmerksam verfolgt.

Auf der Konferenz wurden zwar keine weiterführenden Beschlüsse gefaßt, jedoch herrschte Einvernehmen darüber, die Maßnahmen zum Schutz der Ozonschicht zu verstärken. Wegen des unerwartet schnellen Ozonabbaus über der Antarktis sah die Konferenz vor, die Fristen für die FCKW-Reduzierung drastisch zu verkürzen. Festgestellt wurde, daß dies jedoch nur in Solidarität und fairem Lastenausgleich zwischen Industrie- und Entwicklungsländern geschehen könne. Ein hohes Maß an Übereinstimmung bestand zwischen Wissenschaft, Industrie und Regierungen über die Notwendigkeit, so schnell wie möglich unschädliche FCKW- und Halon-Ersatzstoffe zu finden und einzusetzen. Der in der vorangegangenen Woche gefaßte Beschluß des EG-Rates (vgl. Nr. 3), Produktion und Verbrauch von FCKW so bald wie möglich um mindestens 85 Prozent einzuschränken und bis zum Ende des Jahrhunderts vollständig einzustellen, fand Zustimmung unter den Konferenzteilnehmer.

Die von China und Indien mit Nachdruck erhobene Forderung nach wirksamer Unterstützung bei der Entwicklung einer FCKW-freien Technologie durch die Industriestaaten wurde von vielen anderen Sprechern der Dritten Welt unterstützt. Vorgeschlagen wurde die Errichtung eines Finanzierungsfonds zur Förderung entsprechender Projekte in Entwicklungsländern und die Bereitstellung von FCKW-Ersatzstoffen und -technologien zu angemessenen Bedingungen. Die Vertreter vieler Industriestaaten zeigten hierfür Verständnis und erklärten die Bereitschaft, nach Lösungen zu suchen, die den Interessen der Entwicklungsländer Rechnung tragen.

#### — Internationale Umweltschutzkonferenz in Den Haag

Auf der internationalen Umweltschutzkonferenz in Den Haag am 11. März 1989 wurde von Staats- und Regierungschefs sowie Ministern aus 24 Ländern die Erklärung von Den Haag unterzeichnet. In dieser Grundsatzresolution, die jedoch keine bindende Verpflichtung enthält, wird die Schaffung neuer institutioneller Befugnisstrukturen im Rahmen der Vereinten Nationen vorgeschlagen, die im Zusammenhang mit dem Schutz der Erdatmosphäre für die Bekämpfung einer weiteren weltweiten Erwärmung der Atmosphäre zuständig sind und auch im Falle von Meinungsverschiedenheiten über wirksame Entscheidungsverfahren verfügen sollen. Nicht geklärt werden konnte, ob die neue Institution aus einer schon bestehenden UN-Organisation durch Kompetenzstärkung hervorgehen oder ob zu diesem Zweck eine völlig neue Behörde geschaffen werden soll. Diese Institution hätte die Aufgabe, neben wissenschaftlichem Informationsaustausch, einschließlich der Öffnung des Zugangs zu benötigten Technologien, auch Instrumentarien zu entwickeln, die den Schutz der Erdatmosphäre sicherstellen.

Darüber hinaus spricht sich die Haager Erklärung für einen Lastenausgleich zwischen armen und reichen Staaten beim Umweltschutz aus. Staaten, für die die Maßnahmen zum Schutz der Atmosphäre eine besondere Bürde darstellt, sollen eine angemessene Entschädigung für die ihnen entstehenden Kosten erhalten.

Kritik wurde von verschiedener Seite an der Auswahl der Teilnehmer des Gipfels geübt. Die Initiatoren des Treffens — Frankreich, Norwegen und die Niederlande — hatten die USA, die Sowjetunion und China nicht eingeladen, weil sie befürchtet hatten, daß die Gegensätze zwischen diesen Staaten die Erfolgsaussichten der Konferenz schmälern würden (vgl. zu Haager Konferenz auch Abschnitt F, 1. Kap., Nr. 1.8).

#### — Wirtschaftsgipfel in Paris

Auf dem Wirtschaftsgipfel vom 14. bis 16. Juli 1989 in Paris war die globale Umweltzerstörung eines der drei Hauptthemen. Beraten wurde die Gefährdung durch den Abbau der Ozonschicht, den zusätzlichen Treibhauseffekt und die Abholzung tropischer Wälder.

Die auf der ersten Vertragsstaatenkonferenz zum Montrealer Protokoll in Helsinki gezogenen Schlußfolgerungen wurden auf dem Treffen begrüßt. Gefordert wurde unter anderem der völlige Verzicht auf Produktion und Verwendung der im Montrealer Protokoll geregelten FCKW bis spätestens Ende dieses Jahrhunderts, die Regelung weiterer ozonzerstörender Substanzen sowie die Förderung geeigneter Ersatzstoffe und -technologien.

#### 2. Maßnahmen innerhalb der Europäischen Gemeinschaften

Die Europäischen Gemeinschaften sind hinsichtlich des Schutzes der Erdatmosphäre in zweifacher Hinsicht bedeutsam. Zum einem bilden sie einen weltweit einzigartigen Versuch, durch Übergabe eines Teiles der nationalen Souveränität zu rationaleren Entscheidungsstrukturen bei grenzüberschreitenden Problemen zu gelangen. Zum anderen haben sie in der Gipfelerklärung vom Dezember 1988 beschlossen, in der weltweiten Debatte über globale Umweltgefahren eine führende Rolle zu übernehmen.

Bereits 1980 und 1982 verabschiedete die EG zwei Entscheidungen (80/372/EWG; 82/795 EWG), in denen festgelegt wird, die Produktionskapazität für die vollhalogenierten FCKW 11 und 12 nicht auszuweiten, sowie im Anwendungsbereich Spraydosen den Verbrauch dieser Stoffe bis Ende 1981 um mindestens 30 Prozent gegenüber dem Stand des Jahres 1976 zu reduzieren. Die dort vorgeschriebenen Kontrollen hatten jedoch nur begrenzte Wirkung und betrafen lediglich zwei ozonschädliche Stoffe.

Die Aktivitäten innerhalb der EG bis 1988 zur FCKW- und Halonreduzierung sind im 1. Bericht der Enquete-Kommission, Abschnitt C, 3. Kapitel, Nr. 1 ausführlich dargestellt.

## 2.1 Verordnung (EWG) Nr. 3322/88 des Rates über bestimmte Fluorchlorkohlenwasserstoffe und Halone, die zu einem Abbau der Ozonschicht führen

Mit der Entscheidung 88/540/EWG des Rates vom 14. Oktober 1988 genehmigte die Gemeinschaft das Wiener Übereinkommen zum Schutz der Ozonschicht und das Montrealer Protokoll über Stoffe, die zu einem Abbau der Ozonschicht führen.

Zur Umsetzung des Montrealer Protokolls wurde die „Verordnung (EWG) Nr. 3322/88 des Rates über bestimmte Fluorchlorkohlenwasserstoffe und Halone, die zu einem Abbau der Ozonschicht führen“ erlassen. Aufgabe dieser am 1. Januar 1989 in Kraft getretenen EG-Verordnung ist es sicherzustellen, daß die Rechtsvorschriften in allen Mitgliedsstaaten mit den Verpflichtungen des Montrealer Protokolls in Einklang stehen.

Die Einhaltung der im Protokoll festgelegten Produktions- und Verbrauchsmengen wird den FCKW- und Halonherstellern in der Gemeinschaft übertragen sowie durch Einfuhrbeschränkungen gewährleistet. Es ist vorgesehen, den Import der Stoffe aus Drittländern in die Gemeinschaft durch Einfuhrlizenzen zu kontrollieren und dabei deutlich einzuschränken. Darüber hinaus wird ab 1. Januar 1990 die Einfuhr der geregelten Verbindungen aus Drittländern, die keine Vertragsparteien sind, verboten (vgl. zur Verordnung und der dazu gefaßten EntschlieÙung im 1. Bericht der Enquete-Kommission, Abschnitt C, 3. Kap., Nr. 1).

Hinzuweisen ist in diesem Zusammenhang darauf, daß die EG-Mitgliedsstaaten unter den Voraussetzungen des Paragraphen 130 des EWG-Vertrags strengere Reduktionsquoten, als auf EG-Ebene beschlossen, durchsetzen können (vgl. zu dieser Frage im einzelnen das Studienprogramm der Enquete-Kommission „Vorsorge zum Schutz der Erdatmosphäre“, Studie E.1.a, S. 24 ff.)

## 2.2 EG-Umweltratssitzung (März 1989)

Eine weitere wichtige Maßnahme zum Schutz der Ozonschicht wurde in einer Sitzung der EG-Umweltminister am 2. März 1989 getroffen. Vereinbart wurde, innerhalb der Europäischen Gemeinschaften deutlich schärfere Reduzierungen, als im Montrealer Protokoll vorgesehen, vorzunehmen.

Die Erklärung des Rates sieht vor, die Produktion und den Verbrauch der geregelten FCKW in der Gemeinschaft sobald wie möglich um 85 Prozent zu verringern, und bis zum Jahr 2000 vollständig auf diese Verbindungen zu verzichten. Darüber hinaus beschloÙ die EG, sich auf der ersten Folgekonferenz zum Montrealer Protokoll im Mai 1989 in Helsinki für eine gleichlautende Verschärfung der Regelungen einzusetzen.

## 2.3 Vorschlag einer Verordnung des Rates über Stoffe, die zu einem Abbau der Ozonschicht führen

Der im Januar 1990 von der EG-Generaldirektion Umwelt, Nukleare Sicherheit und Katastrophenschutz

vorgelegte Verordnungsentwurf stellt eine weitere drastische Verschärfung der bisherigen Regelungen dar (3). Dieser Entwurf, in den die Erklärung des Rates vom März 1989 und die Ergebnisse der Sitzung der EG-Ratsgruppe „Umweltfragen“ im Dezember 1989 eingeflossen sind, soll die geltende EG-Verordnung 3322/88 ersetzen.

Die geplante Verordnung sieht als Konsequenz aus den jüngsten wissenschaftlichen Erkenntnissen sowohl eine Verschärfung der Reduktionsquoten als auch eine Kontrolle bisher nicht geregelter ozonschädlicher Verbindungen vor. Im Vergleich zu der bisher geltenden Verordnung legt der Entwurf den Termin für die Einstellung von Produktion und Verbrauch ozonzerstörender Substanzen drei Jahre früher fest, also auf 1997.

Bezogen auf das Jahr 1986 müssen Produktion und Verbrauch aller vollhalogenierten FCKW bis

- 1992 um 50 Prozent,
- 1996 um 85 Prozent und
- 1997 um 100 Prozent

reduziert werden.

Darüber hinaus wurden in die Stoffliste der zu regelnden Substanzen zusätzlich alle weiteren vollhalogenierten FCKW sowie die Verbindungen Tetrachlorkohlenstoff und Methylchloroform aufgenommen.

Für Tetrachlorkohlenstoff ist, mit Ausnahme der Verwendung als Zwischenprodukt in der chemischen Produktion, ebenfalls die Einstellung der Produktion und des Verbrauchs bis Ende 1997 vorgesehen. Des weiteren sieht die Verordnung vor, Produktion und Verbrauch von Halonen bis 1996 um die Hälfte und bis Ende 1999 um 100 Prozent zu reduzieren sowie für die Verbindung Methylchloroform eine Reduktion um 20 Prozent nach dem Jahr 1998 und um 40 Prozent nach dem Jahr 2000 zu erreichen.

Der Entwurf dieser Verordnung baut im wesentlichen auf den Vorschlägen im ersten Bericht der Enquete-Kommission auf (vgl. Nr. 3.1).

## 3. Maßnahmen in der Bundesrepublik Deutschland

### 3.1 Empfehlungen der Enquete-Kommission (1988)

Die Enquete-Kommission hat im November 1988 ihren ersten Bericht vorgelegt, der neben dem aktuellen Kenntnisstand im Bereich Ozonabbau in der Stratosphäre und Treibhauseffekt eine Reihe weitgehender Empfehlungen zum Schutz der Ozonschicht enthält (vgl. 1. Bericht der Enquete-Kommission, Abschnitt C, 5. Kap.). Diese ergänzen den Beschluß des Deutschen Bundestages vom 22. September 1988, der bereits auf den bis zum Juli 1988 von der Enquete-Kommission erarbeiteten Beratungsergebnissen beruhte.

Bei den Empfehlungen wird unterschieden zwischen Maßnahmen zur Reduzierung von FCKW und Halonen auf internationaler, europäischer und nationaler Ebene. Diese werden im folgenden dargestellt.

### 3.1.1 Internationale Maßnahmen

Die Enquete-Kommission war schon damals der Auffassung, daß das Montrealer Protokoll bei weitem nicht ausreichte, um die bereits eingetretenen und zu erwartenden Schäden im Zusammenhang mit dem Ozonabbau in der Stratosphäre zu reduzieren. Die Kommission sah daher die nahezu völlige weltweite Beseitigung der FCKW und Halone und eine drastische Verschärfung der Regelungen des Montrealer Protokolls als dringend notwendig an.

Nach Auffassung der Kommission war es erforderlich, daß die Bundesregierung im Rahmen der Verhandlungen mit allem Nachdruck folgende Ziele verfolge:

- eine Erhöhung der FCKW- und Halon-Reduktionsquoten sowie eine Verkürzung der Zeitpläne:  
Entsprechend einem Reduktionsplan sollte spätestens im Lauf des Jahres 1999 eine Reduktion der Produktion und des Verbrauchs der geregelten Stoffe – ausgehend von den Werten des Jahres 1986 – um mindestens 95 Prozent erreicht werden;
- die Einbeziehung der im Montrealer Protokoll noch nicht geregelten Chlorverbindungen – wie zum Beispiel Tetrachlorkohlenstoff, Methylchloroform und der H-FCKW;
- die Abschwächung und wenn möglich Beseitigung der Ausnahmetatbestände, namentlich der Zulassung eines globalen Pro-Kopf-Verbrauchs; dabei muß durch die Industrieländer der kostengünstige Technologietransfer FCKW-freier Ersatzstoffe und -technologien in Entwicklungsländer sichergestellt werden;
- eine Regelung, durch die die Hersteller in Vertragsstaaten des Montrealer Protokolls verpflichtet werden, keine Produktion in Nicht-Unterzeichnerstaaten zu verlagern oder auszuweiten;
- eine weltweite Kennzeichnung FCKW-haltiger Roh-, Zwischen- und Endprodukte;
- die Regelung einer staatlichen Kontrolle der Produktions- und Verbrauchszahlen;
- eine Regelung über eine effektive, von der interessierten Öffentlichkeit nachvollziehbare Kontrolle der erzielten Reduktionsquoten und
- die Bewahrung der Möglichkeit jedes Vertragsstaates, nationale Regelungen zu treffen mit dem Ziel, die vorgegebenen Quoten erheblich früher zu erreichen, als im Protokoll festgelegt ist.

Die Enquete-Kommission sah es ferner als erforderlich an, daß sich die Bundesregierung im Rahmen des Weltwirtschaftsgipfels 1989 dafür einsetze, daß die führenden westlichen Industrienationen Maßnahmen zum Schutz der Ozonschicht beschließen.

### 3.1.2 Maßnahmen innerhalb der Europäischen Gemeinschaften

Die Enquete-Kommission sah es ferner als notwendig an, daß die weltweit als erforderlich angesehenen

FCKW- und Halon-Reduzierungsquoten innerhalb der EG schneller erreicht werden sollten.

Unabhängig von einer Verschärfung des Montrealer Protokolls sollten innerhalb der EG entsprechend einem vorgegebenen Reduktionsplan die Produktion und der Verbrauch der geregelten Stoffe – ausgehend von den Werten des Jahres 1986 – spätestens im Laufe des Jahres 1997 um mindestens 95 Prozent reduziert werden.

Die Bundesregierung wurde ersucht, im Rahmen des EG-Gipfels Ende 1988 darauf hinzuwirken, daß sich die EG-Mitgliedsstaaten im Rahmen der Verhandlungen zur Überprüfung des Montrealer Protokolls vor allem für eine Erhöhung der Reduktionsquoten, eine Verkürzung der Zeitpläne und eine Erweiterung der Stoffliste einsetzten.

### 3.1.3 Nationale Maßnahmen

Die Enquete-Kommission war außerdem der Auffassung, daß die Bundesrepublik Deutschland bei den Maßnahmen zum Schutz der Erdatmosphäre beispielhaft vorangehen sollte. Entsprechend einem festgelegten Reduktionsplan sollte vorgesehen werden, spätestens im Laufe des Jahres 1995 Produktion und Verbrauch der geregelten Stoffe um mindestens 95 Prozent zu reduzieren. Der Reduktionsplan sieht vor, die Produktion und den Verbrauch der im Montrealer Protokoll geregelten FCKW und Halone in der Bundesrepublik Deutschland gegenüber dem Stand von 1986 wie folgt zu verringern:

- im Laufe des Jahres 1990 um mindestens 50 Prozent,
- im Laufe des Jahres 1992 um mindestens weitere 25 Prozent,
- im Laufe des Jahres 1995 um mindestens weitere 20 Prozent.

Um dieses Ziel zu erreichen, sollten zunächst freiwillige Selbstverpflichtungen der Industrie und des Handels vorgesehen werden. Sollten diese bis zu einer gesetzten Frist nicht zustande gekommen sein oder nicht eingehalten werden, sollten unverzüglich rechtliche Regelungen eingeleitet werden, die im selben Zeitraum dasselbe Ergebnis erzielen sollten.

Im einzelnen sah die Enquete-Kommission Selbstverpflichtungen oder Regelungsvorschläge in folgenden Bereichen vor:

#### – Aerosolbereich

Eine Verschärfung der bestehenden Selbstverpflichtung der Industriegemeinschaft Aerosole e.V. vom August 1988 dahingehend, daß ab 1. Januar 1990 in Druckgaspackungen jährlich weniger als 1 000 Tonnen FCKW eingesetzt werden dürfen, deren Verwendung sich auf lebenserhaltende medizinische Systeme beschränken sollte. Gleichzeitig sollte die Verpflichtung die Erklärung enthalten, daß in diesem Bereich H-FCKW 22 nicht eingesetzt wird.

Sollte eine entsprechende Verschärfung der Selbstverpflichtung nicht bis zum 1. März 1989 beim Bundesminister für Umwelt, Naturschutz und

Reaktorsicherheit vorliegen, sollte die Bundesregierung dem Deutschen Bundestag bis zum 1. September 1989 den Entwurf für eine gleich gerichtete nationale, EG-konforme Verbotsregelung zuzuleiten.

#### – Kälte- und Klimabereich

Die Bundesregierung wurde ferner ersucht, in Zusammenarbeit mit dem zuständigen Industrieverband bis zum 1. März 1989 ein Entsorgungskonzept für den Kälte- und Klimabereich vorzulegen. Sei dies nicht erreichbar, sollte die Bundesregierung dem Deutschen Bundestag bis zum 1. Juni 1989 einen Vorschlag für eine rechtliche Regelung dieses Bereiches vorlegen.

Die Bundesregierung wurde ersucht, bis zum 31. Dezember 1990 eine Verpflichtungserklärung der entsprechenden Industrie und des Handels zu erwirken – die auch sämtliche Importe erfassen sollte – wonach spätestens vom 1. Januar 1992 an als Kühl- und Kältemittel nur noch Ersatzstoffe eingesetzt werden sollten, die auf lange Sicht als Ersatzstoffe dienen könnten.

Darüber hinaus sollte in diese Selbstverpflichtung auch eine Verpflichtung zur Kennzeichnung der Recyclingfähigkeit der Kühl- und Kältemittel sowie der Geräte aufgenommen werden.

Sollte eine entsprechende Verpflichtungserklärung der Industrie nicht bis zum 31. Dezember 1990 beim Bundesminister für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit vorliegen, sollte die Bundesregierung dem Deutschen Bundestag bis zum 1. Juni 1991 einen Vorschlag für eine gleichgerichtete, EG-konforme rechtliche Regelung zuleiten.

#### – Verschäumungsbereich

Die Bundesregierung wurde ersucht, bis zum 31. Dezember 1989 eine Selbstverpflichtungserklärung der schaumstoffherstellenden Industrie zu erreichen, nach der im Jahre 1992 und in den folgenden Jahren eine Reduktion im Bereich der Schaumstoffherstellung um 80 Prozent erreicht werden sollte.

Dabei sollte der FCKW-Einsatz bei Polyurethan-Hartschäumen um mindestens 50 Prozent und bei Integralschäumen um 80 Prozent reduziert werden. Für die Weichschaumherstellung sollte kein FCKW verwendet werden dürfen. XPS soll nicht mehr mit vollhalogenierten FCKW hergestellt werden; auch für die Herstellung mit teilhalogenierten ozonschädigenden FCKW sollte nur eine Übergangszeit von maximal zehn Jahren vorgesehen werden. Bei den übrigen Schaumstoffen sollte eine Reduktion um 90 Prozent erreicht werden.

Insbesondere sollte unverzüglich eine Regelung angestrebt werden, die die Herstellung und das Inverkehrbringen von FCKW in Verpackungsmaterial und Wegwerfgeschirr in der Bundesrepublik Deutschland unverzüglich unterbinden sollte.

#### – Reinigungs- und Lösemittelbereich

Die Bundesregierung wurde ferner ersucht, bis spätestens zum 31. Dezember 1989 eine Verpflichtungserklärung der entsprechenden Industrien

und Verbände herbeizuführen, nach der spätestens vom 1. Januar 1992 an der FCKW-Einsatz bei Reinigungs- und Lösemitteln durch den Einsatz von Ersatzstoffen und -technologien sowie durch gekapselte Reinigungssysteme auf unumgängliche Einsatzbereiche eingeschränkt und in diesem Bereich ab dem Jahre 1995 um 95 Prozent verringert werden sollte.

Dabei sollten insbesondere die umweltrelevanten Eigenschaften der Chlorkohlenwasserstoffe verstärkt berücksichtigt werden.

– Soweit entsprechende Verpflichtungserklärungen in den unter 3. und 4. genannten Bereichen nicht bis zum 31. Dezember 1989 beim Bundesminister für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit vorgelegen haben sollten, sollte die Bundesregierung dem Deutschen Bundestag bis zum 1. Juni 1990 Regelungsvorschläge zur Erreichung der genannten Zielsetzungen vorlegen.

– Durch Vereinbarungen sollte mit den Trägern der Feuerwehr, den Brandschutzbeauftragten sowie den Versicherungen erreicht werden, daß

– bei Übungen auf den Einsatz von Halonen verzichtet wird, soweit die Sicherheit dies zuläßt, und

– Halone aus Feuerlöschgeräten prinzipiell wiederverwertet werden.

– Hinsichtlich der Ausgestaltung der Selbstverpflichtungen der Industrie oder der rechtlichen Regelungen wurde gefordert, daß diese klare, für Parlament und Öffentlichkeit nachvollziehbare Kontrollmechanismen vorsehen sollten. Es sollte gewährleistet sein, daß es zu keinerlei Wettbewerbsverzerrungen innerhalb der EG kommen werde und ausländische Produzenten die Selbstverpflichtungen nicht unterlaufen könnten.

– Die Bundesregierung wurde aufgefordert, dem Deutschen Bundestag jährlich einen Bericht über die eingeleiteten Maßnahmen im internationalen, europäischen und nationalen Bereich sowie eine Bilanzierung der Reduktionsquoten in der Bundesrepublik Deutschland zuzuleiten. Dabei sollte gleichzeitig darüber berichtet werden, ob und in welcher Form eine Chlorbilanz der Atmosphäre vorgelegt werden kann.

### 3.2 Umsetzung der Empfehlungen

Eine Reihe von politischen Gremien hat sich intensiv mit dem ersten Bericht der Enquete-Kommission auseinandergesetzt und – dies ist hervorzuheben – sich den darin enthaltenen Darstellungen und Empfehlungen angeschlossen.

Die Konferenz der Umweltminister des Bundes und der Länder und einige Landesregierungen haben die Vorschläge der Kommission zur Reduzierung der FCKW einstimmig angenommen.

### 3.2.1 Beschluß des Deutschen Bundestages vom 9. März 1989

Der Deutsche Bundestag hat den ersten Bericht bereits am 7. Dezember 1988 beraten.

In seiner 131. Sitzung am 9. März 1989 hat er einstimmig eine EntschlieÙung angenommen (4). Darin stimmt er sowohl den im ersten Kommissionsbericht enthaltenen Analysen des gegenwärtigen Kenntnisstandes über den Ozonabbau in der Stratosphäre und den Treibhauseffekt sowie den daraus zu ziehenden Schlußfolgerungen als auch den Maßnahmevorschlägen inhaltlich voll zu.

Daraus ergab sich eine Reihe internationaler, EG-weiter und nationaler Maßnahmen, die von der Bundesregierung dringlich umzusetzen waren beziehungsweise sind.

### 3.2.2 Selbstverpflichtungen der Industrie

Bisher liegen folgende Selbstverpflichtungen der Industrie vor:

#### – Produktion vollhalogenerter FCKW

In einer Verpflichtung, die der Verband der Chemischen Industrie (VCI) im Mai 1990 vorgelegt hat, erklären die deutschen Hersteller, die Produktion von vollhalogenierten FCKW im Jahr 1995 einstellen zu wollen.

#### – Aerosolbereich

Zwar wurde durch die bestehende Selbstverpflichtung der Industriegemeinschaft Aerosole e.V. (IGA) vom August 1987 der FCKW-Verbrauch in Druckgaspackungen von etwa 20 000 Tonnen im Jahr 1987 auf etwa 2 500 Tonnen im Jahr 1989 gesenkt. Die im Bundestagsbeschluß geforderte Verschärfung dieser Selbstverpflichtung dahin gehend, daß ab 1. Januar 1990 jährlich weniger als 1 000 Tonnen FCKW im Aerosolbereich verwendet werden, liegt jedoch nicht vor.

Der geforderten Erklärung, im Aerosolbereich kein H-FCKW 22 einzusetzen, ist die IGA dagegen in einer erweiterten Selbstverpflichtungserklärung nachgekommen.

Die Industrie erwartet, daß der FCKW-Verbrauch im Jahr 1990 noch bei etwa 1 500 Tonnen liegen wird, weil FCKW sowohl in einigen Arzneimitteln als auch in einer Reihe technischer Anwendungen derzeit nicht ersetzbar seien. Der Bundesverband der Pharmazeutischen Industrie e.V. (BPI) gibt den gegenwärtigen FCKW-Verbrauch im medizinischen Bereich mit etwa 700 Tonnen pro Jahr an (5). Das geschätzte Einsparpotential beträgt in den Jahren 1990/1991 nach Angaben des BPI etwa 160 Tonnen (vgl. Kap. 2, Nr. 3.1.5).

Die Enquete-Kommission ist demgegenüber der Auffassung, daß sowohl im medizinischen als auch im technischen Anwendungsbereich erheblich höhere FCKW-Einsparpotentiale vorhanden sind.

Es wird daher als notwendig erachtet, daß FCKW-haltige Druckgaspackungen nur mit einer Zulassungsge-

nehmigung hergestellt werden dürfen, die ausschließlich für lebensnotwendige Arzneimittel und unumgängliche technische Anwendungen erteilt wird.

#### – Kälte- und Klimabereich

Die deutschen FCKW-Hersteller haben sich verpflichtet, während der Ausstiegsphase FCKW und Kaltöle aus Kälte- oder Klimageräten sowie FCKW aus dem Isolierschaum zurückzunehmen und zu verwerten. Wenn ein Recycling nicht möglich sei, würden die Hersteller Dritte mit der Entsorgung beauftragen. Die Wiederverwertung der FCKW werde jedoch nur bis zu dem Zeitpunkt übernommen, zu dem Produktionsanlagen betrieben würden (6).

Die kommunalen Spitzenverbände und die für Abfallentsorgung zuständigen obersten Landesbehörden haben ein Entsorgungskonzept von Haushaltskältegeräten vorgelegt.

Die Forderung des Bundestages, spätestens ab 1. Januar 1992 nur noch Ersatzstoffe einzusetzen, die auf lange Sicht als Ersatzstoffe dienen können, ist nach Aussage von Kältemittel- und Kältegeräteherstellern sowie dem Deutschen Kälte- und Klimatechnischen Verein e.V. (DKV) nicht zu erfüllen. Eine entsprechende Selbstverpflichtung wurde daher bisher nicht unterzeichnet.

#### – Verschäumungsbereich

Der Industrieverband Polyurethan-Hartschaum e.V. (IVPU) hat im März 1989 angeboten den FCKW-Einsatz bei der Hartschaumherstellung um 50 Prozent pro Produktionseinheit zu verringern. Diese Verpflichtung ist jedoch nicht geeignet, die Forderungen des Bundestagsbeschlusses zu erfüllen. Bei einer Zunahme der Nachfrage nach Hartschaumprodukten gegenüber dem Jahr 1986, von der auch der IVPU ausgeht, wäre die FCKW-Gesamtreduktion geringer als 50 Prozent. Ein weiteres von der IVPU im Dezember 1989 in Aussicht gestelltes Reduktionsangebot konnte ebenfalls nicht als ausreichend angesehen werden. Der Verband der Weichschaumhersteller hatte zwar die geforderte Selbstverpflichtung, die einen vollständigen FCKW-Verzicht vorsah, vorgelegt. Dieses Angebot war jedoch mit der Forderung verbunden, ein Importverbot für Weichschäume, die mit FCKW hergestellt wurden, zu erlassen. Faktisch wurde dieses Reduktionsangebot wieder zurückgenommen, da die Voraussetzungen für das Reduktionsangebot (Verfügbarkeit von Ersatzstoffen und anderes) als nicht gegeben angesehen wurden.

#### – Reinigungs- und Lösemittelbereich

Der Reinigungs- und Lösemittelbereich ist sehr unübersichtlich strukturiert und umfaßt eine Vielzahl von Branchen. Es ist daher aussichtsreicher, die Forderungen des Bundestagsbeschlusses auf rechtlichem Wege und nicht durch Verhandlungen über freiwillige Maßnahmen der entsprechenden Industrien und Verbände zu erreichen. Die am 18. Mai 1990 vom Bun-



deskabinett beschlossene zweite Verordnung zur Durchführung des Bundes-Immissionsschutzgesetzes (2. BImSchV) sieht daher vor, daß nach einer Übergangsfrist der Einsatz von FCKW in Oberflächenbehandlungs-, Chemischreinigungs- und Textilausrüstungs- sowie Extraktionsanlagen untersagt wird.

#### – Löschmittel

Der Bundesminister der Verteidigung hat in einem Erlaß am 12. April 1989 seinen nachgeordneten Bereich angewiesen, Halone bei Feuerlöschübungen nicht mehr einzusetzen.

Darüber hinaus werden nach Angaben des Verbandes der Sachversicherer seit Mai 1989 in stationären Halon-Anlagen Probeflutungen mit dem Prüfmedium Kohlendioxid und nur in Ausnahmefällen mit Halonen durchgeführt.

#### – Einschätzung

Als Ergebnis ist festzuhalten, daß die meisten der im Bundestagsbeschluß festgelegten Fristen mittlerweile verstrichen sind, ohne daß entsprechende Selbstverpflichtungserklärungen der Industrie vorliegen. Weiterhin zeichnet sich ab, daß auch innerhalb der noch laufenden Fristen die Forderungen des Deutschen Bundestages nicht durch freiwillige Vereinbarungen erfüllt werden können. Hinzu kommt, daß durch derartige Zusagen Importe von Erzeugnissen, die ozonschädigende Stoffe enthalten oder mit Hilfe solcher Stoffe hergestellt worden sind, nicht unterbunden werden können.

Es sind daher rechtliche Regelungen unumgänglich, die die Inhalte des Bundestagsbeschlusses in vollem Umfang umsetzen.

### 3.2.3 Verordnung zum Verbot von bestimmten, die Ozonschicht abbauenden Halogenkohlenwasserstoffen (FCKW-Halon-Verbotsverordnung)

Der Bundesminister für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit (BMU) hat bereits Ende 1989 eine Verordnung erarbeitet, die auf der Grundlage von Paragraph 17 des Chemikaliengesetzes ein Verwendungsverbot der FCKW und Halone vorsieht. Das Bundeskabinett hat am 30. Mai 1990 die Verordnung zum Verbot von bestimmten, die Ozonschicht abbauenden Halogenkohlenwasserstoffen (FCKW-Halon-Verbotsverordnung) beschlossen (7). Die Verordnung stützt sich wegen des FCKW-Rücknahmegebotes auch auf das Abfallgesetz, insbesondere Paragraph 14 AbfG „Kennzeichnung, getrennte Entsorgung, Rückgabe- und Rücknahmepflicht“.

Die zum Erlaß einer Verordnung nach dem Chemikaliengesetz notwendige Anhörung der beteiligten Kreise fand am 22. und 23. Januar 1989 statt.

Mit dieser FCKW-Verbotsverordnung sollen die Ziele des Bundestagsbeschlusses vom 9. März 1989, der auf den Empfehlungen der Enquete-Kommission basiert, umgesetzt werden.

Die Verordnung bedarf noch der Zustimmung des Bundesrates. Darüber hinaus muß die EG-Kommission bei jeder nationalen Verordnung, die weitergehende Vorschriften als EG-Regelungen vorsieht, prüfen, ob eine gemeinschaftliche Regelung erfolgen soll.

#### – Liste der geregelten Stoffe

Die Verordnung regelt die Verwendung der vollhalogenierten FCKW 11, 12, 13, 112, 113, 114 und 115 sowie der Halone 1211, 1301, 2402 und zusätzlich die Verbindungen Tetrachlorkohlenstoff, Methylchloroform und den teilhalogenierten Stoff H-FCKW 22. Tetrachlorkohlenstoff wird in der Bundesrepublik Deutschland im wesentlichen als Zwischenprodukt zur FCKW-Herstellung eingesetzt. Die Substanz Methylchloroform, die vorrangig als Lösemittel dient, wird im Reinigungs- und Lösemittelbereich in der zweiten Verordnung nach dem Bundes-Immissionsschutzgesetz geregelt. Der teilhalogenierte Stoff H-FCKW 22 ist in der Verordnung erfaßt, um Zuwachsraten zu verhindern, die die erzielten Erfolge durch die Reduktion der übrigen geregelten Stoffe gefährden könnten.

#### – Reduktionsquoten und Zeitpläne

Mit der auf der Grundlage des Chemikaliengesetzes erlassenen Verordnung wird in den verschiedenen Anwendungsbereichen das Inverkehrbringen, die Verwendung und teilweise auch die Herstellung der geregelten ozonschädlichen Stoffe je nach Einsatzmöglichkeit der Ersatzstoffe und -technologien stufenweise bis zum Jahr 1995 verboten.

#### – Aerosolbereich

Drei Monate nach Inkrafttreten der Verbotsverordnung ist die Herstellung von Druckgaspackungen mit den genannten Stoffen verboten; die Produkte müssen spätestens nach sechs Monaten aus dem Verkehr gezogen werden. Befristete Ausnahmen gelten im medizinischen Bereich, wenn es sich um Arzneimittel zur Behandlung schwerwiegender Gesundheitsstörungen handelt (zum Beispiel Asthma-Sprays), soweit keine Ersatzprodukte entwickelt worden sind. Auf Antrag können durch das Umweltbundesamt im Einvernehmen mit der Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung auch befristete Ausnahmen für besondere technisch-industrielle Anwendungen zugelassen werden. Dies gilt nur für Anwendungen, bei denen die geregelten Stoffe nicht als Treibgas, sondern wegen ihrer technischen Eigenschaften, zum Beispiel in Reinigungs- und Pflegesprays oder als Trennmittel, eingesetzt werden.

Die Vorschrift erfaßt auch FCKW-getriebene Druckgasanfanen, die vielfach bei Sportveranstaltungen zur Lärmerzeugung verwendet werden.

Montageschäume in Druckgaspackungen werden aus systematischen Gründen in den Regelungen des Bereichs Kunststoffverschäumung erfaßt.

### – Kältemittel

Bei Kälte- und Klimaanlageanlagen stehen je nach der Anlagengröße, der Kälteleistung und dem Anwendungsbereich Ersatzkältemittel derzeit nur eingeschränkt zur Verfügung. In den Verbotsvorschriften wird daher zwischen Erzeugnissen mit mehr als fünf Kilogramm und weniger als fünf Kilogramm Kältemittelinhalt unterschieden.

1. Erzeugnisse mit mehr als fünf Kilogramm Kältemittelinhalt: Die Verordnung verbietet das Inverkehrbringen und die Verwendung ozonschädlicher Kältemittel sowie die Herstellung und das Inverkehrbringen von Erzeugnissen, die diese Kältemittel enthalten.

In Anlagen mit mehr als fünf Kilogramm Inhalt werden die geregelten Stoffe – mit Ausnahme von H-FCKW 22 – ab dem 1. Januar 1992 verboten.

In Teilbereichen mobiler Kälteanlagen sind die übrigen geregelten Stoffe ab 1. Januar 1994 verboten.

Im Bereich Industrie und Großgewerbe (Schlachthäuser und anderes) darf die Verbindung H-FCKW 22 gegebenenfalls bis 1. Januar 2000 verwendet werden.

Im Bereich Kleingewerbe (Kühlmöbel, Schauvitrienen und anderes), Gebäudeklimaanlagen, Wärmepumpen und Transportfahrzeuge tritt die Vorschrift der Verordnung für H-FCKW 22 ebenfalls erst am 1. Januar 2000 in Kraft.

2. Erzeugnisse mit weniger als fünf Kilogramm Kältemittelinhalt:

In Anlagen mit weniger als fünf Kilogramm Inhalt (Haushaltsgeräte, Kleingewerbe, Autoklimaanlagen und ähnliches) tritt die Vorschrift – außer für H-FCKW 22 – am 1. Januar 1995 in Kraft. Bei Verwendung von H-FCKW 22 soll die Vorschrift der Verordnung (wie auch bei Erzeugnissen mit mehr als fünf Kilogramm Kältemittelinhalt) am 1. Januar 2000 in Kraft treten.

Kältemittel, die die geregelten Stoffe enthalten, dürfen in Altanlagen bis zu deren Außerbetriebnahme weiter verwendet werden, wenn keine Kältemittel mit geringerem Ozonerstörungspotential nach dem Stand der Technik eingesetzt werden können. Ebenso dürfen die mit diesen Kältemitteln gefüllten Erzeugnisse weiterhin in Verkehr gebracht werden, wenn sie vor Inkrafttreten des Verbots hergestellt wurden.

### – Schaumstoffe

Die Vorschrift verbietet die Verwendung der geregelten Stoffe zur Herstellung von Schaumstoffen sowie das Inverkehrbringen dieser Schaumstoffe und entsprechender Erzeugnisse.

Es ist vorgesehen, die Herstellung von Polyurethan-Hartschäumen zur Wärmedämmung mit den geregelten Stoffen – mit Ausnahme von H-FCKW 22 – ab 1. Januar 1995 zu untersagen. Der Einsatz von H-FCKW 22 zur Hartschaumherstellung ist ab 1. Januar

2000 verboten. Zur Herstellung sonstiger Schaumstoffe ist die Verwendung ozonschädlicher Stoffe ab 1. Januar 1992 verboten; eine Ausnahme bildet H-FCKW 22, dessen Verwendung ab 1. Januar 2000 verboten ist.

Die Herstellung von mit H-FCKW 22 getriebenem Montageschaum in Druckgaspackungen ist ab dem 1. Januar 1993 verboten.

Die geregelten Stoffe dürfen zur Herstellung von Verpackungsmaterial und Schaumstoffgeschirr mit Inkrafttreten der Verordnung nicht mehr eingesetzt werden. Sind diese Produkte vor Inkrafttreten des Verbotes hergestellt worden, dürfen sie weiterhin in Verkehr gebracht werden.

### – Reinigungs- und Lösemittel

Das Herstellen, Inverkehrbringen und die Verwendung von Reinigungs- und Lösemitteln mit den geregelten Stoffen ist ab 1. Januar 1992 verboten.

Das Verbot gilt nicht, soweit die ozonschädlichen Reinigungs- und Lösemittel in Anlagen nach der 2. Verordnung zur Durchführung des Bundes-Immissionsschutzgesetzes verwendet werden dürfen und ausschließlich für den Einsatz in diesen Anlagen bestimmt sind.

Reinigungs- und Lösemittel, die die genannten Stoffe enthalten, dürfen nach dem Inkrafttreten des Verbotes bis zu sechs Monate in Verkehr gebracht und bis zu neun Monate verwendet werden.

Das Umweltbundesamt kann auf Antrag befristete Ausnahmen für Tetrachlorkohlenstoff und Methylchloroform zulassen, wenn der Einsatz dieser Stoffe zwingend erforderlich ist.

### – Löschmittel

Für Halon 1211, das vorrangig in Handfeuerlöschern eingesetzt wird, tritt das Herstellungs- und Verwendungsverbot am 1. Januar 1992 in Kraft.

Die in stationären Anlagen der Brandbekämpfung eingesetzten Halone 1301 und 2402 sind ab 1. Januar 1996 verboten.

Halon 1211, das vor dem 1. Januar 1992 hergestellt wurde, darf höchstens bis zum 1. Januar 1994 in Handfeuerlöschern verwendet werden. Halon 1301 kann bis zur Außerbetriebnahme der Geräte und Anlagen verwendet werden, wenn diese vor dem 1. Januar 1996 hergestellt wurden.

Die physikalisch-technische Bundesanstalt kann im Einvernehmen mit dem Umweltbundesamt befristete Ausnahmen zulassen, wenn die Stoffe bei der Brandbekämpfung zum Schutz von Leben und Gesundheit der Menschen zwingend erforderlich ist.

### – Betrieb, Instandhaltung, Außerbetriebnahme, Rücknahmeverpflichtung

Die Verordnung verbietet außerdem beim Betrieb, bei Instandhaltungsarbeiten und bei Außerbetriebnahme

von Geräten, die ozonschädliche Kälte- oder Löschmittel enthalten, die Stoffe in die Atmosphäre freizusetzen, wenn es sich nach dem Stand der Technik vermeiden läßt. Des weiteren sind die Vertreiber der geregelten Stoffe und Zubereitungen verpflichtet, diese nach Gebrauch zurückzunehmen oder die Rücknahme sicherzustellen.

#### – Kennzeichnung

Neben diesen Verwendungs- beziehungsweise Herstellungsverböten wird mit dem Inkrafttreten der Verordnung eine Kennzeichnungspflicht eingeföhrt. Produkte, die die geregelten Stoffe enthalten, dürfen nur in Verkehr gebracht werden, wenn sie mit „enthält ozonabbauende FCKW“ beziehungsweise „enthält ozonabbauendes Halon“ markiert sind.

Dies gilt jedoch nicht für

- Polyurethan-Hartschäume, die die Verbindung H-FCKW 22 enthalten,
- Weichschäume, die mit den geregelten Stoffen hergestellt wurden,
- H-FCKW 22-getriebene Montageschäume in Druckgaspackungen sowie
- Löse- und Reinigungsmittel, die Tetrachlorkohlenstoff und Methylchloroform enthalten.

#### 4. Maßnahmen in anderen Ländern

Eine Vielzahl von Staaten hat, neben der Unterzeichnung und Ratifikation des Montrealer Protokolls und dem Bemühen, auf internationaler Ebene eine Verschärfung dieses Abkommens auf der zweiten Vertragsstaatenkonferenz zu erreichen, die Notwendigkeit erkannt, weitergehende nationale Maßnahmen zum Schutz der Ozonschicht zu ergreifen. Diese innerstaatlichen Regelungen sind von großer Bedeutung, da sie sowohl der Ozonerstörung entgegenwirken als auch Einfluß auf die Entwicklung der FCKW- und Halonstrategien in anderen Ländern nehmen.

So haben sich die in den USA, Kanada sowie einigen skandinavischen Staaten bereits in den siebziger Jahren erlassenen FCKW-Verbote im Anwendungsbereich der Spraydosen als sehr wirksame nationale Maßnahmen erwiesen.

Andererseits waren jedoch einige Staaten bisher nicht bereit, die internationalen Übereinkommen zum Schutz der Ozonschicht zu unterzeichnen. Die Einrichtung eines internationalen Fonds auf der zweiten Vertragsstaatenkonferenz zum Montrealer Protokoll und die dort beschlossene Bereitstellung von jeweils 40 Millionen US-Dollar an Indien und die VR China ermöglicht den Staaten der Dritten Welt, einen Teil der Unkosten, die durch die Umsetzung der FCKW-Reduktionsmaßnahmen entstehen, zu decken, und führten zu der Bereitschaft, den internationalen Vereinbarungen beizutreten (vgl. Nr. 1.1.3).

Den FCKW-Regelungen in den Entwicklungsländern kommt in Zukunft eine immer größere Bedeutung zu, da zum einen ein sehr großes FCKW-Verwendungs-

potential vorhanden ist und zum anderen die Regelungen des Montrealer Protokolls eine Reihe von Ausnahmestimmungen zulassen (vgl. Nr. 1.1.2 und Nr. 1.1.3).

Im folgenden werden in Kürze die jüngsten innerstaatlichen Aktivitäten zum Schutz der Ozonschicht dargestellt (vgl. auch 1. Bericht der Enquete-Kommission, Abschnitt C, 3. Kapitel, Nr. 2).

#### – Australien

Das Australian Environmental Council hat im August 1989 den Bericht „Strategy for Ozone Protection“ veröffentlicht, der Richtlinien zu einer 95prozentigen Verminderung des FCKW-Verbrauchs im Jahr 1995 und ein generelles Verbrauchsverbot im Jahr 1998 vorsieht. Die Herstellung von Sprühdosen auf FCKW-Basis ist in Australien seit September 1989 verboten, ihr Verkauf ab Juni 1990. Die Herstellung von Verpackungs- und Isolierstoffen (Polystyrol), die unter Verwendung von FCKW produziert wurden, ist mit Zustimmung der Hersteller Ende 1989 eingestellt worden. Des weiteren sollen Halon-Feuerlöschgeräte mit Wirkung vom 1. Januar 1990 aus dem Handel gezogen werden. Das australische Parlament verabschiedete im März 1989 das „Ozone Protecting Bill“, das die gesetzliche Grundlage für Maßnahmen der Bundesregierung zum Schutz der Ozonschicht ist. Soweit bundesstaatliche Regelungen erforderlich sind, haben die Bundesstaaten ihre Bereitschaft erklärt, gesetzliche Vorschriften bis Mitte 1990 zu verabschieden.

#### – Finnland

Die finnische Regierung hat im März 1989 einen rechtlich bindenden Grundsatzbeschluß verabschiedet, der vorsieht, die FCKW-Anwendung bis Ende des Jahres 1998 zu beenden. Als Zwischenziel wurde eine Verminderung um 25 Prozent bis Ende 1990 und um 50 Prozent bis Ende 1993 vereinbart.

#### – Indien

Im Anschluß an die zweite Vertragsstaatenkonferenz zum Montrealer Protokoll im Juni 1990 in London hat Indien den Beitritt zur Wiener Konvention und zum Montrealer Protokoll angekündigt. Bis dahin hatte Indien dies abgelehnt, weil beide Vereinbarungen auf die Bedürfnisse der Industrieländer zugeschnitten seien und diese zunächst ihren Beitrag zum Schutz der Ozonschicht leisten müßten. Darüber hinaus habe Indien nicht die nötigen Mittel, die Einhaltung der Protokollvorschriften zu gewährleisten, ohne die wirtschaftliche Entwicklung im Land zu beeinträchtigen. Hinzu komme, daß der FCKW-Verbrauch in Indien mit nur 0,003 Kilogramm pro Kopf vernachlässigbar klein sei im Vergleich zu beispielsweise den USA mit 1,7 Kilogramm pro Kopf.

#### – Kanada

Die kanadische Regierung plant, durch entsprechende Gesetzgebung die FCKW-Verwendung bis

1999 um 85 Prozent einzuschränken. In der Provinz Ontario, in der etwa die Hälfte der kanadischen FCKW-Menge eingesetzt wird, hat die Regierung einen noch deutlich schärferen Reduktionsplan vorgelegt.

#### – Neuseeland

In Neuseeland ist am 1. Januar 1990 der „Ozone Layer Protect on Act“ in Kraft getreten, der ein schrittweises Verkaufs-, Produktions- und Verbrauchsverbot von FCKW und Halonen vorsieht. Die Einfuhr, die Produktion und der Verkauf FCKW-haltiger Spraydosen ist danach ab 1. März 1990 verboten. Darüber hinaus ist die schrittweise Einstellung des Gebrauchs von FCKW für und in Kühl- und Klimaanlage bis 1999, in der Produktion von Schaumstoffen bis 1996, als Lösungsmittel im Reinigungsgewerbe bis 1999 und in anderen Anwendungsbereichen bis 1996 vorgesehen.

#### – Niederlande

Der Gebrauch von FCKW und Halonen soll in den Niederlanden bis 1995 um 99,5 Prozent vermindert werden. Ende 1997 soll der Gebrauch vollständig verboten werden. Dies ist der wesentliche Inhalt des FCKW-Aktionsprogramms, das Ende Juni 1990 in einem gemeinsamen Plan der niederländischen Wirtschaft- und Umweltbehörden vorgelegt wurde. Der Plan beruht auf einer freiwilligen Übereinkunft der niederländischen Unternehmensverbände, des Umweltministeriums, der niederländischen Provinzen sowie der niederländischen Gemeinden. Nach 1995 soll lediglich noch der Verbrauch FCKW-haltiger Arzneimittel, die auf Rezept verschrieben werden, möglich sein.

#### – Norwegen

In Norwegen ist vorgesehen, den Verbrauch ozonzerstörender Substanzen bis 1991 um 50 Prozent und bis 1995 um 90 Prozent zu verringern.

#### – Österreich

Für die Republik Österreich ist im Bundesgesetzblatt vom 15. Juni 1990 eine Verordnung über Beschränkungen und Verbote der Herstellung, des Inverkehrbringens und der Verwendung von vollhalogenierten FCKW verkündet worden. Die Verwendung von vollhalogenierten FCKW in Druckgaspackungen ist in der Republik Österreich bereits durch eine andere Verordnung verboten. In der Kälte- und Klimatechnik soll je nach Anwendungsbereich ab 1. Januar 1992 und 1. Januar 1994 ein Verwendungsverbot gelten. Ein Verbot der Verwendung von FCKW bei der Herstellung von Schaumstoffen ist ab 1. Januar 1993 vorgesehen. Die Verordnung sieht ein Verwendungsverbot von FCKW in chemischen Reinigungen ab 1. Januar 1995 und in anderen Lösemittel-Anwendungsbereichen ab 1. Januar 1992 beziehungsweise 1. Januar

1994 vor. In allen nicht genannten Einsatzgebieten ist die FCKW-Verwendung ab dem 1. Januar 1991 untersagt. Durch die 576. Verordnung des Bundesminister für Umwelt, Jugend und Familie vom 16. August 1990 ist die Herstellung, das Inverkehrsetzen und die Verwendung von Halonen verboten.

#### – Schweden

Die Regierung und das Parlament in Schweden haben einen detaillierten Ausstiegsplan beschlossen, der vorsieht, den Verbrauch von FCKW bis Ende 1990 um 50 Prozent zu verringern und bis Ende 1994 die Verwendung dieser Stoffe, mit Ausnahme der medizinischen Anwendung, vollständig zu unterbinden.

#### – Schweiz

In der Schweiz wurde im Mai 1990 der Entwurf für eine Reform der Stoffverordnung vorgelegt. Die Regierung plant, den Verbrauch von FCKW und Halonen bis 1995 um mehr als 90 Prozent zu reduzieren und ihn später ganz zu unterbinden. Der Verbrauch der FCKW soll in der Schweiz von 8 400 Tonnen im Jahr 1986 auf rund 2 000 Tonnen im Jahr 1991 und bis 1995 auf wenige hundert Tonnen gesenkt werden. Der Import von Halon-Löschmitteln wird 1991 eingestellt. Der Verbrauch von Methylchloroform soll ebenfalls stufenweise verringert werden und ab dem Jahr 2000 verboten sein. Der Import und Verkauf von Halonen und von Halon-Handfeuerlöschern ist ab 1991 verboten. Ab 1992 ist die Herstellung stationärer Halon-Löschanlagen und ab 1994 das Nachfüllen bestehender Anlagen mit Halonen verboten.

#### – USA

Am 1. Januar 1990 trat in den Vereinigten Staaten von Amerika eine Steuer für die Herstellung von FCKW in Kraft. Die Höhe der Grundsteuer ist knapp drei Dollar pro Kilogramm FCKW und erhöht sich entsprechend dem Ozonzerstörungspotential der einzelnen Verbindungen. Ab 1992 erhöht sich die Steuer auf über drei Dollar und im darauf folgenden Jahr auf über fünf Dollar. Die Steuer steigt ab 1995 mit einer jährlichen Rate von etwa einem Dollar pro Kilogramm FCKW an.

#### – VR China

Die VR China hat ebenfalls im Anschluß an die zweite Vertragsstaatenkonferenz zum Montrealer Protokoll die Bereitschaft zum Beitritt zur Wiener Konvention und dem Montrealer Protokoll erklärt. Bis dahin war darauf verwiesen worden, daß man sich zur Zeit insbesondere mit der Frage befasse, welche finanzielle Belastung mit einer FCKW-Substitution in allen Anwendungsbereichen verbunden sei. Bei der Lösung dieses finanziellen Problems erwarte China großzügige internationale Hilfe. Bei der Untersuchung der Frage, welche Menge FCKW in China produziert und

freigesetzt wird und welche Maßnahmen zur FCKW-Substitution erforderlich sind, wird China bereits finanziell unterstützt. Eine entsprechende wissenschaftliche Studie, deren Kosten zu 50 Prozent von Finnland übernommen werden, ist seit kurzem in Auftrag gegeben.

## 5. Empfehlungen zum Schutz der Ozonschicht und zur Eindämmung des Treibhauseffektes

### 5.1 Internationale Maßnahmen

Die Enquete-Kommission ist der Auffassung, daß das Montrealer Protokoll auch nach der während der zweiten Vertragsstaatenkonferenz in London beschlossenen Verschärfung (vgl. Nr. 1.1.3) in seiner gegenwärtigen Ausgestaltung nicht für einen umfassenden Schutz der Erdatmosphäre ausreicht. Die Bundesregierung wird ersucht, sich im Rahmen einer im Jahr 1992 anzuberaumenden dritten Vertragsstaatenkonferenz – unter Berücksichtigung der dann vorliegenden oder geplanten Übereinkommen in anderen Regelungsbereichen zur Eindämmung des Treibhauseffektes – mit Nachdruck für eine Novellierung beziehungsweise sofortige Umsetzung bereits beschlossener Vereinbarungen des im Juni 1990 auf der zweiten Vertragsstaatenkonferenz überarbeiteten Montrealer Protokolls einzusetzen und folgende Ziele zu verfolgen (vgl. Abb. 1):

- eine weltweite Verbrauchs- und Produktionseinstellung für alle vollhalogenierten FCKW, alle Halone sowie die Verbindungen Tetrachlorkohlenstoff und Methylchloroform spätestens bis zum Jahr 1997,
- den Einbezug der bisher im Montrealer Protokoll nicht geregelten teilhalogenierten FCKW (H-FCKW) mit dem Ziel, den Verbrauch und die Produktion dieser ebenfalls ozonschädigenden und klimarelevanten Verbindungen weltweit bis spätestens zum Jahr 2005 einzustellen,
- befristeter und begrenzter Einsatz der klimawirksamen FKW (Fluorkohlenwasserstoffe) nur dann, falls und solange nachweislich weder ein ozon- und klimaunschädlicherer Ersatzstoff großtechnisch (befristeter Erlaubnisvorbehalt) noch eine Ersatztechnologie oder ein Ersatzverfahren verfügbar sind,
- Beseitigung der derzeit noch geltenden Ausnahmeregelungen für Entwicklungsländer. Dies soll dadurch erreicht werden, daß durch die Industrieländer sichergestellt wird, daß Ersatzstoffe und -technologien auch in Drittländern zeitgleich wie in den Industrieländern zur Verfügung gestellt werden und die Mehrkosten, die den Entwicklungsländern bei der Einhaltung der Protokollregelungen entstehen, durch finanzielle Unterstützung durch die Industrieländer gedeckt werden,
- eine erhebliche Ausweitung des Finanzvolumens des auf der zweiten Vertragsstaatenkonferenz errichteten multilateralen Fonds zur Unterstützung der Entwicklungsländer auf 2 Milliarden DM. Die Mittel sollen dazu verwandt werden, den Techno-

logietransfer von FCKW-freien Ersatzstoffen und Ersatztechniken zu finanzieren, die entsprechende Ausrüstung bereitzustellen und Expertisen für die Umstellung anzufertigen.

- Zur Mittelerweiterung des Fonds und zum Anreiz für einen schnelleren Ausstieg aus Produktion und Verbrauch ozonschädlicher Stoffe ist die Einführung einer Abgabe für die Herstellung und den Verbrauch der FCKW, Halone und für alle H-FCKW anzustreben. Es wird vorgeschlagen, auf jedes produzierte Kilogramm FCKW und Halon eine Abgabe in Höhe von 10, – DM und für jedes Kilogramm teilhalogenierter FCKW eine Abgabe in Höhe von 5, – DM vorzusehen,
- Regelungen über eine staatliche Kontrolle der Produktions- und Verbrauchszahlen sowie über eine effektive, von der Öffentlichkeit nachvollziehbare Kontrolle der erzielten Reduktionsquoten sind festzulegen,
- Festlegung der im Montrealer Protokoll vorgesehenen Liste von Produkten, die mit ozonschädigenden Stoffen hergestellt worden sind und die gemäß den Regelungen des Montrealer Protokolls unter ein Importverbot fallen sollen,
- weltweite Kennzeichnung aller Roh-, Zwischen- und Endprodukte, die ozonschädigende Stoffe enthalten oder mit ihnen hergestellt wurden.

### 5.2 Maßnahmen innerhalb der Europäischen Gemeinschaften

Die Enquete-Kommission sieht es sowohl zum Schutz der Ozonschicht als auch zur Eindämmung des zusätzlichen Treibhauseffektes als notwendig an, daß die weltweit als erforderlich angesehenen Reduzierungsquoten innerhalb der EG unabhängig von den internationalen Vereinbarungen erreicht werden (vgl. Abb. 1). Dies bedeutet, daß

- der Vorschlag einer Verordnung des Rates über Stoffe, die zu einem Abbau der Ozonschicht führen, der unter anderem eine Produktions- und Verbrauchseinstellung aller FCKW bis zum Jahr 1997 vorsieht, umgehend verabschiedet und umgesetzt wird,
- in dem Verordnungsentwurf die Regelungen bezüglich der Halone, und der Verbindungen Methylchloroform und Tetrachlorkohlenstoff weiter verschärft werden sowie diese Stoffe von Ende des Jahres 1997 an nicht mehr produziert und verbraucht werden dürfen,
- die teilhalogenierten FCKW in die Verordnung aufgenommen werden, mit dem Ziel, den Verbrauch und die Produktion dieser ebenfalls ozonschädigenden und klimarelevanten Verbindungen innerhalb der EG bis spätestens zum Jahr 2005 einzustellen,
- befristeter und begrenzter Einsatz der klimawirksamen FKW (Fluorkohlenwasserstoffe) nur dann, falls und solange nachweislich weder ein ozon- und klimaunschädlicherer Ersatzstoff großtechnisch (befristeter Erlaubnisvorbehalt) noch eine

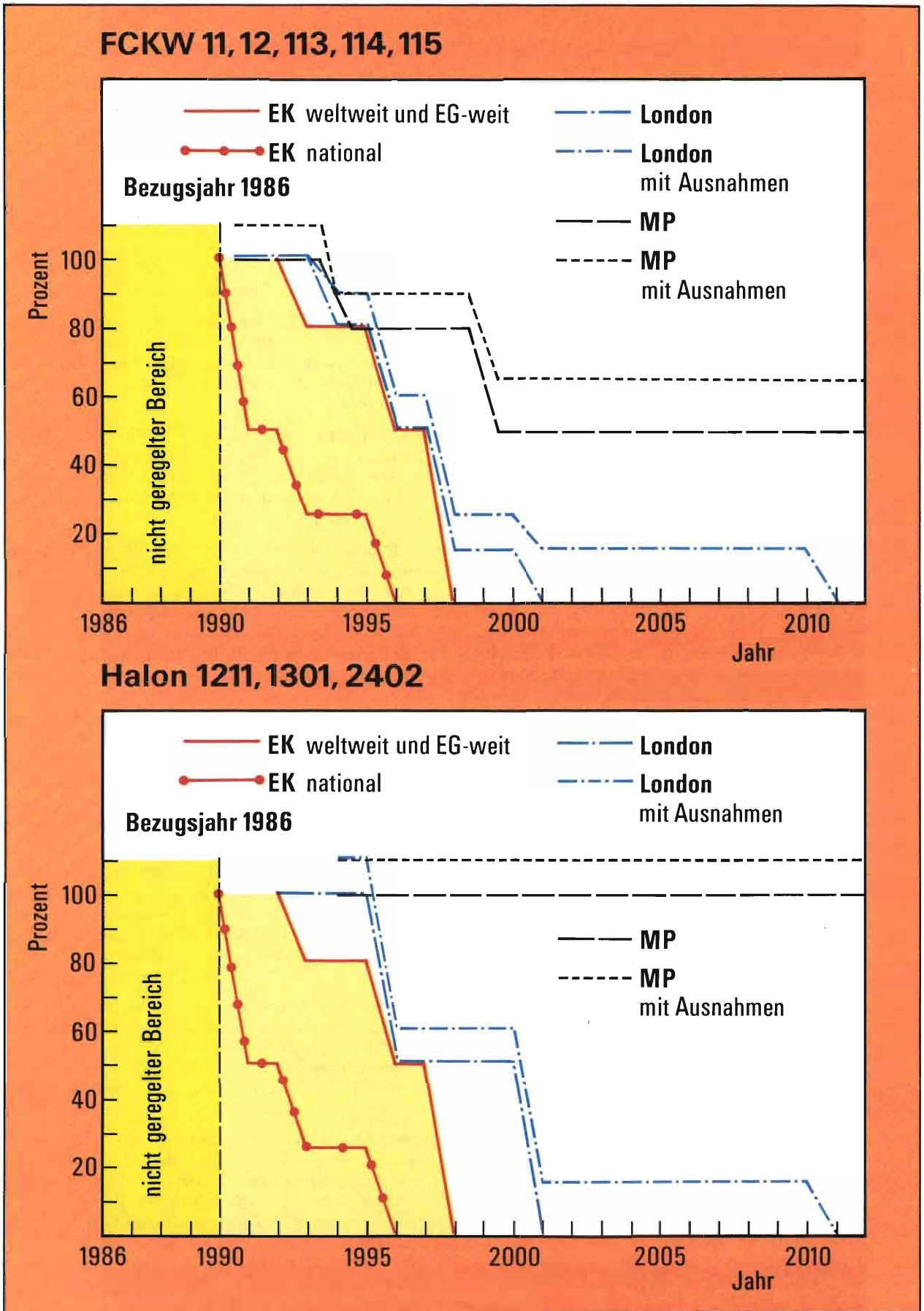
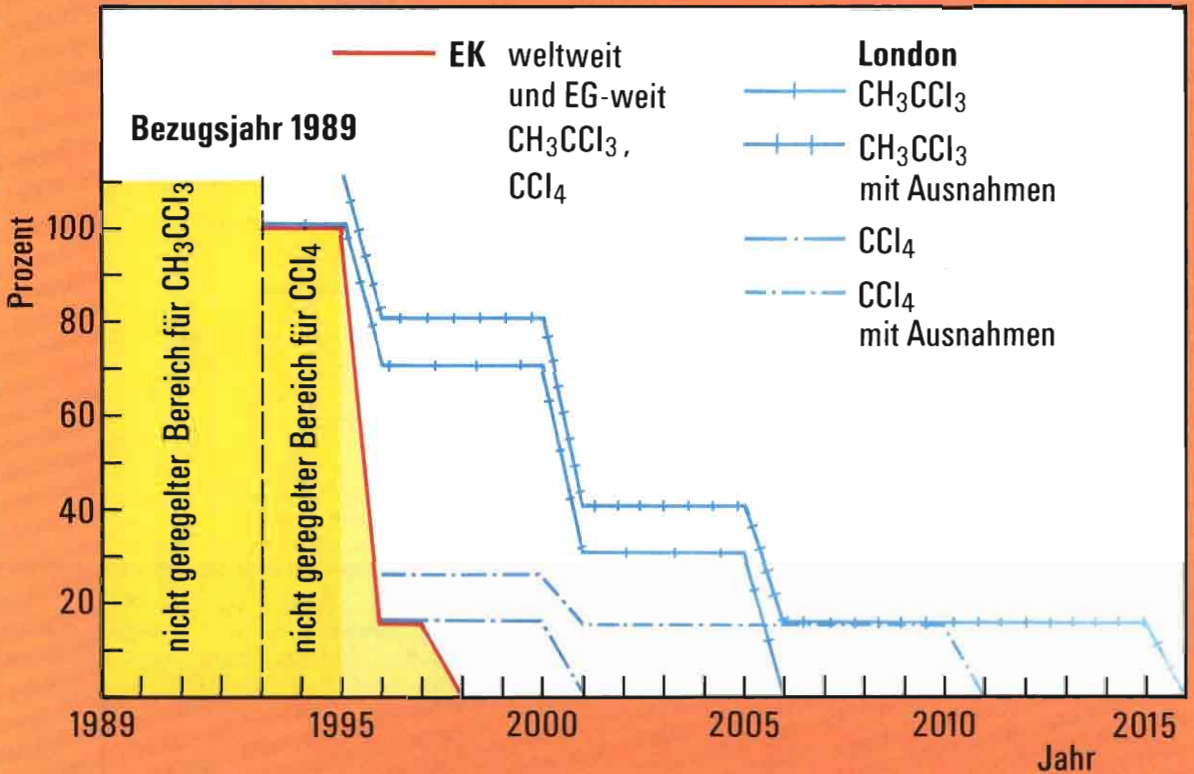
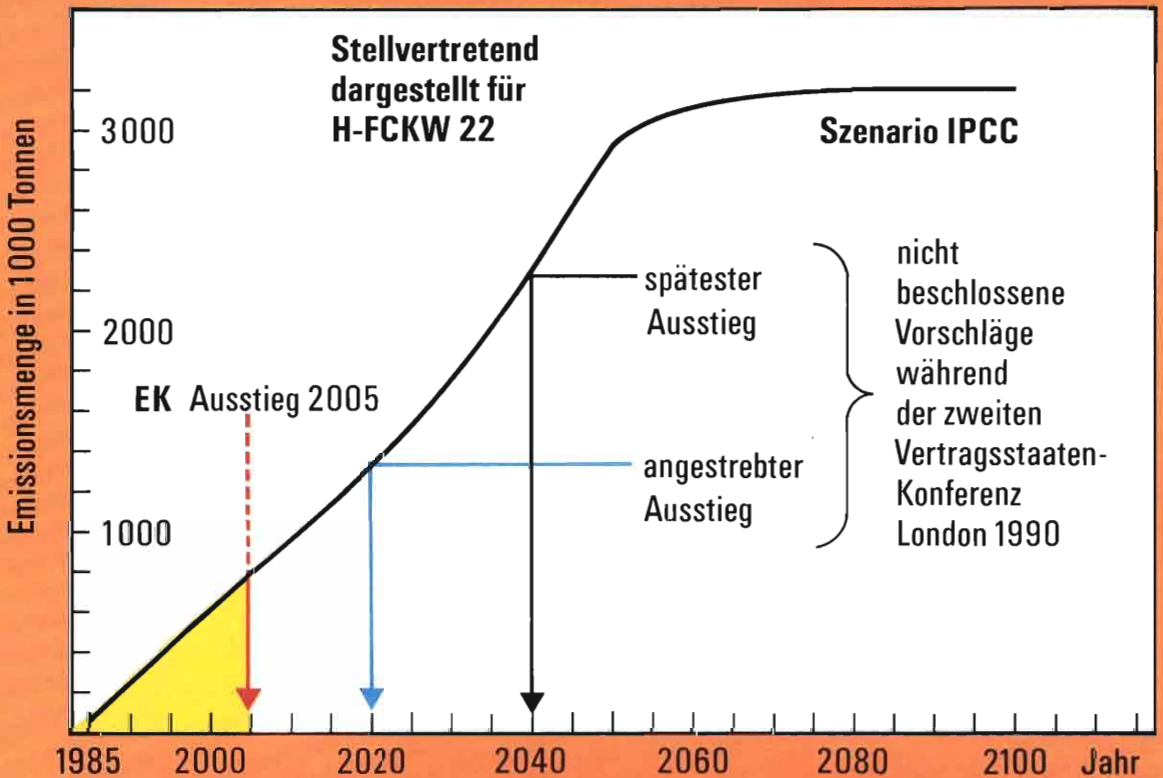


Abb. 1: Stufenplan der Enquete-Kommission zur weltweiten, EG-weiten und nationalen Reduktion der Fluorchlorkohlenwasserstoffe (FCKW), Halone sowie der Verbindungen Tetrachlorkohlenstoff (CCl<sub>4</sub>), Methylchloroform (CH<sub>3</sub>CCl<sub>3</sub>) und teilhalogenierter FCKW im Vergleich zu den Regelungen des Montrealer Protokolls und den auf der zweiten Vertragsstaatenkonferenz in London getroffenen

### Tetrachlorkohlenstoff (CCl<sub>4</sub>), Methylchloroform (CH<sub>3</sub>CCl<sub>3</sub>)



### teihalogenierte FCKW



Vereinbarungen. Diese Verbindungen verursachen die Ozonzerstörung in der Stratosphäre und tragen zum zusätzlichen Treibhauseffekt bei.

Ersatztechnologie oder ein Ersatzverfahren verfügbar sind,

- sich die EG in den Verhandlungen im Rahmen einer 1992 anzuberaumenden dritten Vertragsstaatenkonferenz zur Überprüfung des Montrealer Protokolls nachdrücklich für die von der Enquete-Kommission vorgeschlagenen internationalen Maßnahmen einsetzt,
- für den Fall, daß auf internationaler Ebene eine Verzögerung bei der Einführung der Abgabe für die Herstellung der FCKW und Halone in Höhe von 10,– DM pro Kilogramm und für alle teilhalogenierten FCKW in Höhe von 5,– DM pro Kilogramm eintritt, diese in der EG spätestens 1992 einzuführen ist und zu prüfen ist, ob Abgaben auch auf andere, in der Stratosphäre ozonzerstörende Stoffe auszudehnen sind,
- in der Verordnung ausdrücklich eine Regelung getroffen wird, durch die jeder EG-Mitgliedsstaat die Möglichkeit erhält, nationale Regelungen zu treffen, mit dem Ziel, die im Verordnungsentwurf vorgegebenen Quoten erheblich früher zu erreichen,
- eine Kennzeichnung aller in der EG hergestellten und verwendeten Roh-, Zwischen- und Endprodukte, die ozonschädigende Stoffe enthalten oder mit ihnen hergestellt wurden, eingeführt wird.

Der Ausstieg aus Produktion und Verbrauch der vorgenannten Verbindungen ist die wichtigste Maßnahme zum Schutz der Ozonschicht und die kurzfristig am effizientesten durchzuführende Maßnahme zur Eindämmung des zusätzlichen Treibhauseffektes.

## 6. Literaturverzeichnis

- (1) BT-Drucksache 11/2676: Entwurf eines Gesetzes zu dem Montrealer Protokoll vom 16. September 1987 über Stoffe, die zu einem Abbau der Ozonschicht führen. Bonn den 15. 7. 1988
- (2) Umweltbundesamt: Verzicht aus Verantwortung: Maßnahmen zur Rettung der Ozonschicht. Bericht 7/89, Erich Schmidt Verlag Berlin, 1989

- (3) BR-Drucksache 247/90: Unterrichtung durch die Bundesregierung, Vorschlag einer Verordnung (EWG) des Rates über Stoffe, die zu einem Abbau der Ozonschicht führen. Bonn den 4. 4. 1990
- (4) BT-Drucksache 11/4133: Erste Beschlußempfehlung und Bericht des Ausschusses für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit zu dem Ersten Zwischenbericht der Enquete-Kommission „Vorsorge zum Schutz der Erdatmosphäre“, Bonn den 8. 3. 1989
- (5) Bundesverband der Pharmazeutischen Industrie e.V. (BPI): Schreiben an den Vorsitzenden der Enquete-Kommission „Vorsorge zum Schutz der Erdatmosphäre“. 18. 7. 1989
- (6) Verband der Chemischen Industrie (VCI): Pressemitteilung 30. Mai 1990
- (7) BMU: Beschluß des Bundeskabinetts vom 30. 5. 1990; Verordnung zum Verbot von bestimmten, die Ozonschicht abbauenden Halogenkohlenwasserstoffen. EK-Drs. 11/142

## 7. Tabellenverzeichnis

- Tab. 1: Wiener Übereinkommen zum Schutz der Ozonschicht vom 22. März 1985  
– Stand der Unterzeichnungen, Ratifizierung, Beitritte, Annahmen und Genehmigungen: 20. August 1990
- Tab. 2: Montrealer Protokoll vom 16. September 1987 über Stoffe, die zu einem Abbau der Ozonschicht führen  
– Stand der Unterzeichnungen, Ratifikationen, Beitritte, Annahmen und Genehmigungen: 20. August 1990
- Tab. 3: Regelungen des Montrealer Protokolls sowie der verschärften Fassung entsprechend dem Beschluß der 2. Vertragsstaatenkonferenz vom 27. bis 29. Juni 1990 in London

## 8. Abbildungsverzeichnis

- Abb. 1: Stufenplan der Enquete-Kommission zur weltweiten, EG-weiten und nationalen Reduktion der Fluorchlorkohlenwasserstoffe (FCKW), Halone sowie der Verbindungen Tetrachlorkohlenstoff (CCl<sub>4</sub>), Methylchloroform (CH<sub>3</sub>CCl<sub>3</sub>) und teilhalogenerter FCKW im Vergleich zu den Regelungen des Montrealer Protokolls und den auf der zweiten Vertragsstaatenkonferenz in London getroffenen Vereinbarungen. Diese Verbindungen verursachen die Ozonzerstörung in der Stratosphäre und tragen zum zusätzlichen Treibhauseffekt bei.



## 6. KAPITEL

## Wissenschaftliche Untersuchungsprogramme und Forschungsbedarf

**1. Wissenschaftliche Untersuchungsprogramme****1.1 Ozonforschungsprogramm des Bundesministers für Forschung und Technologie**

Der Bundesminister für Forschung und Technologie stellte am 18. Juli 1988 eine Initiative zur intensiveren Erforschung des Ozonabbaus in der Stratosphäre als Teil des Programms „Umweltforschung und Umwelttechnologie“ vor. Er setzte diese Initiative gemeinsam mit Atmosphärenwissenschaftlern der Großforschungseinrichtungen, Max-Planck-Institute und Universitäten in eine Förderkonzeption zur Erforschung des Ozons in der Stratosphäre (Ozonforschungsprogramm, OFP) um, das nach Beratung im wissenschaftlichen Klimabeirat der Bundesregierung Ende 1988 verabschiedet wurde.

Die fachlichen und fachpolitischen Elemente dieser Förderkonzeption wurden folgendermaßen definiert:

- Konzentration der Forschung auf die Nordhemisphäre, speziell die Nordpolarregion;
- Einbindung eines qualitativ anspruchsvollen deutschen Beitrags in internationale, vornehmlich europäische Programme;
- Koordinierung und Konzentrierung der deutschen Spitzenforschung;
- Aufklärung von Art und Umfang von Veränderungen der Ozonkonzentration sowie Erforschung seiner Ursachen und Folgen;
- Erarbeitung verlässlicher Methoden der Voraussage zukünftiger Entwicklungen des Ozons in der Stratosphäre.

Die wissenschaftlichen Fragestellungen sollen in einem abgestimmten und integrierten Forschungsverbund durch gemeinsame Feldexperimente, Laboruntersuchungen und Modellrechnungen beantwortet werden. Sie wurden auf der Basis des aktuellen naturwissenschaftlichen Kenntnisstandes wie folgt definiert:

- Wie groß ist das Ausmaß des Ozonabbaus in der Stratosphäre in mittleren und höheren Breiten der Nordhemisphäre einschließlich der Arktis?
- Welches ist (sind) die Ursache(n) des Ozonabbaus: Störungen der Chemie und/oder Änderungen der Dynamik? Können chemische und dynamische Ursachen separiert werden?
- In welchem Maße ist die während der Wintermonate beobachtete stärkere Ozonabnahme in mittleren und höheren Breiten der Nordhemisphäre ver-

knüpft mit Vorgängen in der arktischen Stratosphäre? Welches ist der Anteil spezifischer globaler Mechanismen im Winter? Welche Rolle spielen polare stratosphärische Wolken (PSC's) und das globale Schwefelsäure-Aerosol?

- Welches ist die Ursache der beobachteten zeitlich und räumlich begrenzten starken Ausdünnung der Ozonschicht (Mini-Löcher)?
- Wie ist die Ozonabnahme in der Stratosphäre verknüpft mit der zunehmenden Konzentration von FCKW und anderen Spurengasen wie Kohlendioxid (CO<sub>2</sub>), Distickstoffoxid (N<sub>2</sub>O) und Methan (CH<sub>4</sub>)? Welche Rolle spielen langfristige Temperaturänderungen in der unteren Stratosphäre?
- Welche Wechselwirkung besteht zwischen einer Ozonabnahme in der Stratosphäre und dem Klima?
- Wie werden internationale Regulierungsmaßnahmen für FCKW und anderer klimawirksamer Spurengase sich auf die Entwicklung der Ozonschicht auswirken?
- Wie und in welchem Ausmaß wird die bodennahe UV-B-Strahlung beeinflusst?

Das Ozonforschungsprogramm gründet auf Erfahrungen und Aktivitäten von Wissenschaftlern an Großforschungseinrichtungen, Max-Planck-Instituten und Universitäten, die in ihren eigenen Forschungsarbeiten oder durch zusätzliche Förderung durch den Bundesminister für Forschung und Technologie und die Deutsche Forschungsgemeinschaft seit Jahren wichtige und anerkannte Beiträge zur Atmosphärenforschung geleistet haben.

Einen besonderen Stellenwert hatten dabei die Entwicklung von Meßmethoden (LIDAR-Systeme, Massenspektrometersonde, Kryosammler), mit denen verbesserte Aussagen über die Vertikalverteilung und die lokalen Konzentrationen von Spurengasen in der Stratosphäre und oberen Troposphäre möglich sind. Eine Reihe dieser Methoden wurden bereits in den Wintern 1986/87 und 1987/88 in zwei Forschungskampagnen unter dem Namen CHEOPS (CHEMistry of Ozone in the Polar Stratosphere) in Kiruna (Schweden) eingesetzt. Ein Ozon-LIDAR (Light Detection and Ranging)-System wurde auf dem Forschungsschiff „Polarstern“ erfolgreich erprobt und am Observatorium Hohenpeißenberg des Deutschen Wetterdienstes installiert, mit der Absicht, dieses Observatoriums als Ozon-Monitoring-Station auszubauen.

Im Bereich der Laboruntersuchungen wurden durch den Bundesminister für Forschung und Technologie im Rahmen des Förderkonzeptes „Physikalisch-chemische Prozesse in der Atmosphäre“ seit Jahren Vor-

haben gefördert, die die Untersuchung von kinetischen und photochemischen Elementarprozessen der Atmosphärenchemie zum Ziel hatten und Eingabedaten für numerische Modellrechnungen lieferten.

Die Entwicklung von leistungsfähigen, mehrdimensionalen Modellen des atmosphärischen Transports und der Chemie wurde insbesondere im Rahmen des Schwerpunkts „Mittelatmosphärenprogramm (MAP)“ der Deutschen Forschungsgemeinschaft in den Jahren 1981 bis 1987 gefördert. Es waren vor allem die Universitäten Berlin und Köln sowie das Max-Planck-Institut für Chemie in Mainz beteiligt.

Die Wissenschaft hat das Ende 1988 begründete Ozonforschungsprogramm des Bundesministers für Forschung und Technologie schnell angenommen und als geeignete Möglichkeit verstanden, die notwendige Forschung auf breiterer Ebene als zuvor und in koordinierter und konzentrierter Form im Bereich von Chemie und Dynamik der Stratosphäre fortzusetzen und zu vertiefen. Der Bundesminister für Forschung und Technologie hat einen Koordinator berufen, der das Programm ausgestaltet und fortschreiben soll. Ihm stehen Teilprojektkoordinatoren für die Bereiche Feldexperimente, Modelle und Laboruntersuchungen zur Seite.

Aufgrund einer genaueren Analyse des Forschungsbedarfs und der verfügbaren personellen und methodischen Möglichkeiten wird das Ozonforschungsprogramm unterteilt in

- Trenduntersuchungen und
- Prozeßstudien.

Trenduntersuchungen sind Langzeituntersuchungen (länger als 5 Jahre) zur Bestimmung der zeitlichen (und örtlichen) Variation des Ozons, ozonrelevanter Spurenstoffe, physikalischen Parameter und der UV-B-Intensität in Bodennähe. Sie werden im allgemeinen durch bodengebundene Messungen ausgeführt, aber auch durch kontinuierliche Fernmeßmethoden (Satelliten) und regelmäßige in-situ-Beobachtungen (Ballonsonden, Flugzeuge) ergänzt. Das experimentelle Programm wird von der Weiterentwicklung zwei- und dreidimensionaler Modelle begleitet.

Im Rahmen von Trenduntersuchungen ist die Langzeitbeobachtung von Ozon, Quellgasen, Aerosolen, der Temperatur und der UV-B-Intensität vorgesehen. Dazu sind folgende Instrumentarien verfügbar beziehungsweise in der Entwicklung:

#### 1. Ozon

- LIDAR (Ny Alesund, Hohenpeißenberg)
- Ozonsonden
- MW-Radiometer und UV-Spektrometer (Bodenstation)
- 2-D- und 3-D-Modelle
- Satellitendaten -Validierung und -Auswertung

#### 2. Quellgase, Aerosole, Temperatur

- MIPAS (Michelson-Interferometer for Passive Atmospheric Sounding) (verschiedene Bodenstationen der Nordhemisphäre)

- LIDAR (Andoya)
- LIDAR (Ny Alesund, Garmisch Partenkirchen)
- Fernerkundungs- und In-situ-Ballon/Flugzeug-Meßreihen

#### 3. UV-B-Intensität

- Brewer-Spektrometer
- Hochauflösende UV-B-Meßgeräte (mögliche Stationen: Ny Alesund, Nordseeinsel, Hohenpeißenberg, Zugspitze).

Prozeßstudien dienen der Untersuchung und Aufklärung der Ursachen von Ozontrends mit Hilfe der Beobachtung der zeitlichen und räumlichen Veränderlichkeit chemisch und dynamisch relevanter Parameter des Ozons. Sie sind in der Regel als Kampagnen mit einer Dauer von bis zu einem Monat angelegt und werden vornehmlich als luftgetragene Beobachtungen (Flugzeuge, Ballone, Raketen) ausgeführt. Ergänzungen durch intensivierete Bodenmeßreihen sind notwendig, und Satellitendaten müssen verfügbar sein. Laboruntersuchungen und Modelle der „schnellen“ Chemie, einschließlich der heterogenen Prozesse, sind neben den Feldmessungen unverzichtbare und integrale Bestandteile aller Prozeßstudien. Folgende Bestimmungsgrößen und Instrumentarien sind vorgesehen:

#### 1. Temporäre Ozonveränderungen (Struktur, Trends, Unterscheidung von Chemie und Dynamik)

- LIDAR (Ny Alesund)
- Ozonsonden (Ny Alesund)
- MIPAS/DOAS (Differentielle Optische Absorptions Spektrometrie) (Bodenstation)
- LIDAR/MIPAS/DOAS (TRANSALL-Flugzeug)
- Satelliten-Datenauswertung (TOMS, TOVS), MAS (auf ATLAS), später Upper Atmospheric Research Satellite (UARS) und andere.

#### 2. Dynamik der polaren Stratosphäre (Temperatur, Windfelder, Struktur und Stabilität des Polarwirbels)

- Meteorologische Voraussagen
- 3-D-dynamische Modelle
- Beobachtungen konservativer Tracer (Ballone, Flugzeuge, Satelliten)
- In-situ Messungen (Stratosphärenflugzeug)

#### 3. „Schnelle Chemie“ (Ozonabbau-Katalysatoren, Reservoorgase, Test der photochemischen Theorien)

- DOAS/MIPAS (TRANSALL-Flugzeug, Bodenstation)
- MIESR (Ballon)
- UV-Globalstrahlung (TRANSALL-Flugzeug)
- 1-D chemisch-dynamische Modelle
- OD-Lagrange Modelle
- In-situ  $\text{ClO}_x/\text{NO}_x$ -Detektor (Stratosphärenflugzeug)

- MW-Radiometer (Bodenstation, Flugzeug)
  - Laborchemie (ClO, BrO, ClO-Komplexe)
4. Polare stratosphärische Wolken (PSC'S) (Verteilung, Trends, Persistenz, Denitrifizierung, ClX-Aktivierung)
- LIDAR/DOAS/MIPAS/(TRANSALL-Flugzeug)
  - ACIMS (Ballon, Rakete, Stratosphärenflugzeug)
  - In-situ-Aerosoldetektor (TRANSALL-Flugzeug, Stratosphärenflugzeug)
  - $^3\text{H}/^{14}\text{C}$ -Sonde (TRANSALL-Flugzeug)
  - Trajektorien (Lagrange)-Modelle
  - Modelle der Mikrophysik von PSC's
  - Meteorologie der polaren Stratosphäre
  - Laboruntersuchungen zur heterogenen Chemie

Im Bereich der Laboruntersuchungen sollen im Rahmen des Ozonforschungsprogramms thermodynamische, kinetische und photochemische Größen solcher Prozesse bestimmt werden, die für den Ozonabbau in den polaren Regionen verantwortlich gemacht werden. Das erste Ziel dient der physikalisch-chemischen Charakterisierung der festen Phasen. Phasengleichgewichte in der Stratosphäre unter Beteiligung mehrerer Komponenten sind bisher praktisch nicht untersucht. Nur das System  $\text{H}_2\text{O}/\text{HNO}_3$  ist wegen seiner Bedeutung bei der Ausbildung der NAT-Kristalle durch neuere Arbeiten gut charakterisiert. Ob und wie sich das Wasser ( $\text{H}_2\text{O}$ ) / Salpetersäure ( $\text{HNO}_3$ )-Phasengleichgewicht bei Beteiligung weiterer Komponenten wie Chlorwasserstoff (HCl) oder Schwefelsäure ( $\text{H}_2\text{SO}_4$ ) verändert, ist zur Zeit nicht bekannt.

Eine weitere Aufgabe der im Rahmen der OFP durchzuführenden Untersuchungen ist die Charakterisierung der Geschwindigkeiten heterogener Reaktionen. Beachtet werden sollten hierbei auch das  $\text{H}_2\text{SO}_4$ -Aerosol mit variablem Gehalt an  $\text{H}_2\text{O}$  und möglicherweise  $\text{HNO}_3$  und HCl. Im Hinblick auf die zur Zeit diskutierten Katalysezyklen des Ozonabbaus in der polaren Stratosphäre sollen ergänzende Untersuchungen durchgeführt werden. Ein zur Zeit praktisch nicht untersuchtes, aber potentiell bedeutendes Gebiet der polaren Stratosphärenchemie ist die Chemie und Photochemie von Aggregaten und Komplexen, die wegen der besonders niedrigen Temperaturen gebildet werden können. Falls sich die Reaktivität oder Photochemie der Bestandteile solcher Komplexe ändern, kann dies zu erheblichen Konsequenzen für den Gesamtprozeß führen.

Modelle dienen als Bindeglieder zwischen den Laborexperimenten und den Feldmessungen. Sie sind ein notwendiges Hilfsmittel für die Interpretation der Messungen und Beobachtungen im Felde. Modelle ermöglichen es, chemische und dynamische Ursachen der Ozonänderung gemeinsam zu behandeln und sie sind die einzigen Instrumentarien, um langfristige Veränderungen des Ozons vorherzusagen.

Sowohl die bereits vorhandenen Modelle als auch die zur Zeit entstehenden gekoppelten Modelle bieten

die Möglichkeit, einzelne Prozesse und Effekte zu simulieren und ihre Bedeutung für das Gesamtsystem im allgemeinen und für das polare Ozon im speziellen zu untersuchen. Die Behandlung der heterogenen Chemie ist zwar bisher in mehrdimensionalen Modellen noch nicht gelungen, aber in Trajektorien- beziehungsweise eindimensionalen Modellen kann zum Beispiel der Übergang von Chlor aus temporären Senken in eine aktivierte Form – wie es bei Reaktionen an den polaren Wolken geschieht – bereits jetzt befriedigend behandelt werden.

Die Förderung von Forschungsvorhaben im Rahmen des Ozonforschungsprogramms des Bundesministers für Forschung und Technologie begann Mitte des Jahres 1989. Dabei stand zunächst die Implementierung von Feldexperimenten für Trenduntersuchungen im Vordergrund.

Das Alfred-Wegener-Institut für Polar- und Meeresforschung (AWI) und die Universität Bremen unterhalten auf Spitzbergen ein Observatorium zur Beobachtung der Ozonschicht. Es ist in Ny Alesund ( $79^\circ \text{N}$ ,  $12^\circ \text{E}$ ) am Königsfjord gelegen und Bestandteil einer Arktisstation der Bundesrepublik Deutschland. An dieser Station werden zur Zeit ein Ozon-LIDAR und eine Ozonsonden-Station betrieben. Mit dem Ozon-LIDAR werden Konzentrationsprofile mit großer Höhen- und Zeitauflösung gewonnen. Dies ermöglicht, schnelle Veränderungen der Ozonkonzentration, wie sie bei dynamischen Effekten innerhalb von Stunden in wenige Kilometer breiten Höhenbereichen auftreten, zu dokumentieren. Ferner kann die vertikale Verteilung von Aerosolen in der Stratosphäre, insbesondere von polaren stratosphärischen Wolken (PSC's), beobachtet werden. Ozonsonden werden mit großen Wetterballonen gestartet. Sie bestimmen die Ozonkonzentration mit einem naßchemischen Verfahren und senden die Werte per Funk zur Bodenstation. Diese Ballone können bei jeder Witterung gestartet werden und liefern während des etwa zwei Stunden dauernden Fluges ein gut höhenaufgelöstes Ozonprofil. Das Spitzbergen-Observatorium soll in absehbarer Zeit auf die Messung weiterer atmosphärischer Spurenstoffe und meteorologischer Daten erweitert werden. Die apparative Ausstattung soll unter anderem um ein Mikrowellen-Radiometer (Universität Bremen) sowie ein IR-Spektrometer (Kernforschungszentrum Karlsruhe) ergänzt werden.

Das Observatorium in Ny Alesund ist Europas nördlichste Station für bodengebundene Beobachtungen in der Stratosphäre. Am meteorologischen Observatorium Hohenpeißenberg des Deutschen Wetterdienstes werden schon seit längerem gleichartige Messungen vorgenommen. Zusammen mit den Stationen auf der Bäreninsel, in Tromsø, Oslo, Arosa, Biscarosse und der Haute Provence existiert damit ein mitteleuropäisches Netz von Stationen für Ozonmessungen in der Stratosphäre. Sie dienen als Referenz- und Vergleichstationen bei der weltweiten Datenauswertung.

Die dritte Projektphase des CHEOPS (Chemistry of Ozone in the Polare Stratosphere)-Projektes ist im Winter 1989/90 bereits als Teil des Ozonforschungsprogramms des BMFT durchgeführt worden. In einer international angelegten Kampagne unter Beteiligung von acht deutschen Arbeitsgruppen gelang es,

an mehreren Meßstationen im Bereich der Arktis zeitlich koordinierte und abgestimmte Untersuchungen durchzuführen. Unter anderem wurde vom Boden aus die Gesamtsäulendichte von Ozon, Stickstoffdioxid ( $\text{NO}_2$ ), Chlordioxid ( $\text{COClO}$ ) und Bromoxid ( $\text{BrO}$ ) mit einem UV/VIS-Spektrometer (DOAS) in Kiruna (Schweden), Ny Alesund (Spitzbergen) und Sönderström (Grönland) gemessen. Die Untersuchungen in Kiruna und Ny Alesund wurden durch bodengebundene Beobachtungen der Säulendichten von Chlorwasserstoff ( $\text{HCl}$ ), Flußsäure ( $\text{HF}$ ), Salpetersäure ( $\text{HNO}_3$ ) und Chlornitrat ( $\text{ClONO}_2$ ) mit einem IR-Spektrometer (MIPAS) ergänzt. Von der Raketenbasis ESRANGE bei Kiruna aus wurden im Rahmen von CHEOPS-III zwei Ballonflüge mit kryogenen Luftprobensammlern zur Bestimmung der Vertikalverteilung von langlebigen Spurengasen und Radikalen durchgeführt. Außerdem wurde eine raketentragene Abwurfsonde zur Messung der Vertikalverteilung von  $\text{HNO}_3$  mit Hilfe der ACIMS-Methode eingesetzt.

Die Untersuchungen im Rahmen des Ozonforschungsprogramms im Winter 1989/90 waren ein neuer Beitrag zur Ozonforschung im Bereich der Arktis. Die Meßprogramme mußten aber auf einige wenige Stationen beschränkt bleiben, da in Europa ein geeignetes Meßflugzeug fehlt, mit dem großräumige Messungen im Bereich der Arktis durchgeführt werden können.

Das Fehlen einer Flugzeug-Meßplattform für die Atmosphären-(Stratosphären)-Forschung wurde bereits beim Aufstellen des Ozonforschungsprogramms deutlich erkannt. In einer Absprache zwischen dem Bundesminister für Forschung und Technologie und dem Bundesminister der Verteidigung wurde vereinbart, ein C160 TRANSALL-Flugzeug des Wehrtechnischen Dienstes in Manching für die Nutzung im Rahmen des OFP zur Verfügung zu stellen. Für die wissenschaftliche Nutzung im Rahmen dieses Flugzeugs sind zur Zeit gleichzeitige Messungen mit den folgenden fünf Meßgeräten vorgesehen:

- UV-VIS-Spektrometer (DOAS),
- Ozon/Aerosol-LIDAR,
- IR-Spektrometer (MIPAS),
- In-situ-Aerosol-Sammler,
- $^3\text{H}/^{14}\text{C}$ -Sonde.

Die logistische und technische Überprüfung des Meßgeräts ist an Bord der Transall für den Spätsommer 1990 geplant. Ein erster Einsatz in der Arktis ist für den Spätherbst (November/Dezember) 1990 vorgesehen; eine weitere Mission ist für Januar/Februar 1991 geplant.

Die genauen Termine werden unter anderem von der Entwicklung des Polarwirbels abhängen. Eine Genehmigung für Forschungsflüge mit einer Bundeswehrmaschine über Nordnorwegen hat die norwegische Regierung kürzlich erteilt. Danach kann die TRANSALL den Flughafen Tromsø als Basis nutzen; Flüge östlich von  $24^\circ$  Ost und das direkte Überfliegen von Spitzbergen sind aber nicht zulässig.

Bei günstigen meteorologischen Bedingungen wird es möglich sein, an Bord der TRANSALL räumlich auf-

gelöst die Säulendichte von mehreren Spurengasen in der Stratosphäre zu messen, die an der gestörten Chemie in dieser Atmosphärenschicht über der Arktis beteiligt sind. Dazu gehören neben dem  $\text{O}_3$  selbst  $\text{OCIO}$ ,  $\text{BrO}$ ,  $\text{NO}_2$ ,  $\text{HCl}$ ,  $\text{HNO}_3$ ,  $\text{ClONO}_2$  und Aerosole. Die Erfahrungen bei den bevorstehenden Wintereinsätzen werden zeigen, inwieweit zukünftige Intensivmeßkampagnen unter Einbeziehung aller Meßträger technisch optimiert werden können.

Von Seiten der Wissenschaft wird die TRANSALL-Kampagne als erster Einstieg in die simultane flugzeuggetragene Experimentiertechnik gesehen. Die Maschine ist begrenzt auf Gipfelhöhen von neun Kilometer und deshalb im wesentlichen geeignet als Träger für Fernerkundungsexperimente; in-situ Messungen im wichtigen Höhenbereich oberhalb von etwa 15 Kilometer sind mit der TRANSALL nicht möglich.

An einem höherfliegenden Flugzeug (Stratosphärenflugzeug) besteht auch kurzfristig Interesse. Die ACIMS-Technik, das MIPAS-Spektrometer, sowie eine Reihe von in-situ-Meßtechniken zur Bestimmung von ozon- und klimarelevanten Spurengasen sind für solche Einsätze bereits angeboten beziehungsweise in der Planung. Die Notwendigkeit eines solches Meßflugzeug mit einer garantierten Einsatzhöhe von mehr als 15 km für die Atmosphärenforschung wird zur Zeit vom Bundesminister für Forschung und Technologie überprüft. Die einzige Maschine, die Höhen über 15 km erreichen kann, ist in der Bundesrepublik Deutschland zur Zeit das STRATOLAB, eine Weiterentwicklung der EGRETT. Der Betreiber dieses Flugzeugs, das Weltrauminstitut Berlin, hat die Maschine für die Nutzung im Rahmen des OFP angeboten.

Das Ozonforschungsprogramm des BMFT ist ein nationales Programm mit eigener Programmbestimmung und Koordination. Es ist aber nur durchführbar in der Kooperation mit Wissenschaftlern und Institutionen im Ausland, insbesondere in Skandinavien, und wegen der aktiven Beteiligung deutscher Wissenschaftler an internationalen Programmen wie zum Beispiel dem EG/EFTA-Ozonforschungsprogramm. Auch Absprachen mit der Planung der NASA sind dabei notwendig.

## 1.2 Stratosphärisches Ozonforschungsprogramm der EG/EFTA-Länder

Das „Stratospheric Ozone Research Program“ der EG/EFTA-Länder wurde zeitlich parallel mit dem Ozonforschungsprogramm (OFP) als Teil des STEP-Programms der EG ins Leben gerufen. Es wurde von einem wissenschaftlichen Beratungsgremium (Scientific Steering Committee – SSC) definiert und durch ein Büro in Cambridge/England koordiniert. Die Mittel werden über Verbundanträge vergeben, die eine Beratergruppe und das SSC begutachten.

Ein wesentliches Vorhaben des EG/EFTA-Programms ist die eine europäische Ozonkampagne in der Arktis im Winter 1991/92. Dabei sollen unter anderem folgende wissenschaftlichen Fragestellungen bearbeitet werden:

- Struktur und Entwicklung des Nordpolarwirbels;
- „Schnelle Chemie“ von Katalysatoren und ihrer Reservoirkomponente;
- Struktur und Trends der Konzentration des nordpolaren Ozons;
- Denitrifizierung und Bedeutung der polaren stratosphärischen Wolken (PSC's).

Eine Reihe von deutschen Wissenschaftlern hat bereits ihre Absicht zur Beteiligung an dieser Kampagne zum Ausdruck gebracht: Unter anderen soll das TRANSALL-Experiment des OFP als zur Zeit einziges verfügbares Flugzeugexperiment im Winter 1991/92 ebenfalls in Koordination mit der EG/EFTA-Kampagne organisiert werden.

Im Rahmen des EG/EFTA-Programms und unter Beteiligung des BMFT fand vom 3. bis 5. Oktober 1990 in Schliersee der erste europäische Workshop über das polare Ozon statt.

### 1.3 Planungen der amerikanischen Weltraumbehörde NASA

Die bisher erfolgreichsten und umfassendsten Meßkampagnen zur Erforschung des Ozons in der Stratosphäre und der Ursachen für die Veränderung seiner Konzentration in beiden Polarregionen sind von der NASA, zum Teil unter Beteiligung deutscher Wissenschaftler, durchgeführt worden. Für den Zeitraum 1988 bis 1997 hat die NASA durch das OFCM (Office of the Federal Coordinator for Meteorology) folgende Untersuchungen vorgeschlagen:

- Entwicklung und Aufbau eines Netzes zur Beobachtung der von Veränderungen in der Stratosphäre (Network for Detection of Stratospheric Change, NDSC). Dies besteht aus hochentwickelten bodengebundenen Meßverfahren, mit denen an mindestens sechs Stationen eine Reihe von Spurengasen in der Stratosphäre und andere Parameter kontinuierlich beobachtet werden sollen. Dieses Meßnetz dient darüber hinaus auch zur Validierung und Kalibrierung von Satellitenbeobachtungen.
- Kontinuierliche Beobachtungen der Temperatur, mittlerer Windgeschwindigkeit, von O<sub>3</sub>, NO<sub>x</sub>, N<sub>2</sub>O, H<sub>2</sub>O, CH<sub>4</sub>, CO, HCl, FCKW und ClONO<sub>2</sub> mit Hilfe des Upper Atmospheric Research Satellite (UARS) als Teil eines Monitoring-Programms. Der Start des UARS-Satelliten ist für Ende 1991 vorgesehen.
- Nutzung der operationellen Satelliten der NOAA-Serie und Aufbau des Earth Observing System (EOS). Dieses ist ab Mitte der neunziger Jahre vorgesehen.

Eine Beteiligung und Einbindung von NASA-Flugzeugen (DC-8, ER-2) in die europäische Ozonkampagne 1991/92 wird ebenfalls erwogen.

## 2. Forschungsbedarf

Im Ozonforschungsprogramm des Bundesministers für Forschung und Technologie (vgl. Nr. 1.1) ist aus-

führlig beschrieben, wo Forschungsbedarf, unterteilt in Feldexperiment, Laboruntersuchung und Modellentwicklung, zum Verständnis des vom Menschen verursachten Abbaus des Ozons in der Stratosphäre der Nordhemisphäre und speziell der Nordpolarregion existiert. Koordinierte und konsequente Arbeit an diesen Fragestellungen, insbesondere auch in Kooperation mit der internationalen Wissenschaft, erscheint kurzfristig ausreichend, das Ausmaß und die Ursachen der Ozonveränderungen durch die FCKW und andere ozonschädigende Stoffe aufzuklären.

Ungeklärt und weitgehend unerforscht sind darüber hinaus die Veränderungen der UV-B-Intensität in Bodennähe und deren Auswirkungen sowie der Einfluß des heutigen und zukünftigen Flugverkehrs und der Zunahme chemisch und klimatisch wirksamer Spurenstoffe (H<sub>2</sub>O, CH<sub>4</sub>, N<sub>2</sub>O, NO<sub>x</sub>, Partikel) auf die Stratosphäre.

Die Enquete-Kommission sieht es daher als dringend erforderlich an, daß die laufende Ozonforschung rasch ergänzt wird durch

- entsprechende Forschungsaktivitäten zur Bestimmung von Veränderungen der UV-B-Intensität und der Auswirkungen von UV-B-Strahlung auf Fauna und Flora, sowie auf Chemie und Dynamik der Atmosphäre und das Klima, und
- die Erforschung langfristiger regionaler und globaler Veränderungen der chemischen Zusammensetzung der Stratosphäre und der oberen Troposphäre unter anderem durch Flugzeuge, Emissionen von FCKW-Ersatzstoffen und geänderte Emissionen der Biosphäre.

Im einzelnen sieht die Enquete-Kommission Kenntnislücken, Forschungs- und Entwicklungsbedarf in folgenden Bereichen:

- a. Veränderungen der UV-B-Intensität und Auswirkungen auf die Chemie der Atmosphäre
- Veränderungen der UV-B-Intensität in Bodennähe als Folge der anthropogenen Veränderung der atmosphärischen Ozonkonzentration und ihrer Verteilung müssen dringend bestimmt werden. Dazu ist die Entwicklung beziehungsweise die Installation von hochauflösenden und zeitlich stabilen UV-Spektrometern notwendig, die in einem Meßnetz geeigneter Stationen angeordnet und zentral überwacht werden. Die Auswahl der Meßstationen sollte nach ihrer geographischen Lage, ihrer Höhenlage, dem Ausmaß der lokalen Luftverschmutzung sowie der gleichzeitigen Verfügbarkeit von Meß- und Beobachtungseinrichtungen zur Bestimmung des vertikalen Ozonprofils, des Aerosolgehalts und des Wolkenbedeckungsgrades erfolgen. Neben der Einrichtung von UV-B-Meßgeräten an geeigneten Stationen in der Bundesrepublik (Nordseeinsel, Hohenpeißenberg, Zugspitze) wird die Bereitstellung solcher Geräte auch an der Arktisstation Ny Alesund auf Spitzbergen und in tropischen Breiten empfohlen. Die Einbindung dieser Station in ein internationales Netz sowie die regelmäßige gegenseitige Kalibrierung sind sicherzustellen.

- Für die Modellberechnungen von Veränderungen der UV-B-Intensität sind verbesserte Algorithmen zur Bestimmung des Einflusses von Aerosolgehalt, Wolkenart und -bedeckungsgrad sowie der Oberflächenalbedo zu entwickeln. Faktoren, die das Verhältnis von UV-B zu Gesamtstrahlung beeinflussen, sind genauer zu quantifizieren.
- Auswirkungen von veränderter UV-B-Intensität und Verteilung der Spurenstoffe  $O_3$ ,  $NO_x$ ,  $SO_2$ ,  $CO$ ,  $CH_4$ , NMKW und der Aerosole auf die Chemie der Troposphäre sind zur Zeit nur in Ansätzen bekannt.

Es sind weitere Untersuchungen notwendig, in denen die globale Auswirkung dieser Veränderung auf zum Beispiel die Bildungsrate der Hydroxyl (OH)-Radikale sowie deren Auswirkungen auf die Lebensdauer von chemisch und klimatisch wirksamen Spurengasen bestimmt werden.

- b. Auswirkungen von UV-B-Strahlung auf den Menschen sowie auf terrestrische und aquatische Ökosysteme

Um die Wirkung von UV-B-Strahlung auf den Menschen aufzuklären, ist ein weiterer Ausbau der Forschung in folgenden Bereichen notwendig:

- Untersuchungen der Zusammenhänge zwischen erhöhter UV-B-Strahlung (Intensität und Expositionsscharakteristik) und der Entstehung von Hautkrebs, insbesondere der Melanome und ihrer Vorstufen, auch unter Berücksichtigung des Freizeitverhaltens;
- Verbesserte Experimente und Modelle zur Dosis-Wirkung-Beziehung;
- Untersuchungen über die Beeinflussung des Immunsystems, auch in Kombination mit und in Relation zu weiteren Faktoren, sowie die Zusammenhänge zwischen Immunabwehr und der Entstehung von Hautkrebs.

Um die Wirkung auf Landpflanzen besser zu verstehen, sind notwendig:

- experimentelle Untersuchungen der UV-B-Empfindlichkeit von natürlichen Ökosystemen und Nutzpflanzen (Arten, Varietäten) in verschiedenen geographischen Breiten einschließlich der Tropen;
- Untersuchungen der Anpassungsmechanismen von Pflanzen bei erhöhter UV-B-Strahlung;
- Untersuchungen der Beziehungen zwischen erhöhter UV-B-Strahlung und anderen Umweltfaktoren einschließlich des Einflusses auf biogeochemische Kreisläufe.

Im Bereich der aquatischen Ökosysteme besteht folgender Forschungsbedarf:

- Messungen der Eindringtiefe von UV-B-Strahlung in Ozeanwasser in Abhängigkeit von der Konzentration des Phytoplanktons, der Schwebstoffe sowie gelöster anorganischer und organischer Verbindungen;
- Untersuchungen des Einflusses erhöhter UV-B-Strahlung auf die Netto-Primärproduktion von Phytoplankton;

- Untersuchungen zu den direkten und indirekten Auswirkungen von UV-B-Strahlung auf die weiteren Glieder der marinen Nahrungskette.

- c. Regionale und globale Veränderungen der chemischen Zusammensetzung der Stratosphäre und oberen Troposphäre

- Untersuchungen zur Quantifizierung der Bedeutung von Emissionen ( $H_2O$ ,  $NO_x$  und anderen) aus Flugzeugen für den Gehalt der Stratosphäre und der oberen Troposphäre an Ozon und Wasserdampf.

- Untersuchung der atmosphärischen Kreisläufe und möglichen Trends der Quellgase ( $CO_2$ ,  $CS_2$ ) von stratosphärischem Schwefelsäureaerosol.

- Untersuchungen des Stofftransports zwischen Troposphäre und Stratosphäre sowie der Mechanismen, durch die dieser Transport im Hinblick auf Veränderungen von Klima und Stabilität der Stratosphäre verändert werden kann.

- Untersuchungen der Verteilung und der zeitlichen Änderung der Verteilung von H-FCKW und deren Abbauprodukten.

Forschungsvorhaben zu diesem Themenbereich erfordern die möglichst kurzfristige Verfügbarkeit von Flugzeugen, die (a) über genügend Reichweite (Langstreckenflugzeuge) und (b) ausreichende Gipfelhöhe (Stratosphärenflugzeuge bis zu 20 Kilometer Flughöhe) verfügen. Während für ein „Langstreckenflugzeug für wissenschaftliche Expeditionen“ nur entsprechende Vereinbarungen oder zusätzliche Mittel notwendig sind, muß bis zur Bereitstellung eines Stratosphärenflugzeugs noch technologische Entwicklung geleistet werden.

In Laboruntersuchungen sind weitere Arbeiten zur heterogenen chemischen Umsetzung an Eis- und Salpetersäure-hydratkristallen sowie  $H_2SO_4$ -Aerosolen notwendig. Diese sind umso wichtiger, weil wegen der Zunahme der klimawirksamen Spurengase und wegen des ansteigenden Wassergehalts in der Stratosphäre die Häufigkeit der polaren stratosphärischen Wolken zunehmen sollte.

### 3. Förderschwerpunkt „Wirkungen von UV-B-Strahlung“ des Bundesministers für Forschung und Technologie

Der Bundesminister für Forschung und Technologie hat Anfang 1990 den Entwurf für einen Förderschwerpunkt „Wirkungen von UV-B-Strahlung“ vorgelegt. Dieser Entwurf wurde vom Bundesminister für Forschung und Technologie gemeinsam mit Wissenschaftlern der Großforschungseinrichtungen, der Max-Planck-Institute und der Universitäten als Ergebnis einer Definition des Forschungsbedarfs erarbeitet. Es ist beabsichtigt, diesen Entwurf noch in diesem Jahr in eine Förderkonzeption umzusetzen.

Die Begründung des Förderschwerpunkts erfolgt im Rahmen einer staatlichen Vorsorgepolitik, in der der Schutz der Umwelt und der natürlichen Lebensgrundlagen eine besondere Rolle spielen. Der beobachtete und vorraussichtlich weiter zunehmende Abbau der

Ozonschicht in der Stratosphäre und die dadurch an der Erdoberfläche zu erwartende erhöhte UV-B-Strahlung sind Anlaß, die Folgen einer erhöhten UV-B-Strahlung als eine der vordringlichsten Aufgaben der Umweltforschung zu untersuchen. Die verstärkte wissenschaftliche Bearbeitung ist eine direkte Folge der Ergebnisse verschiedener nationaler und internationaler Programme (Ozonforschungsprogramm, Klimaforschungsprogramm, EUROTRAC, STEP), die sich mit der veränderten Zusammensetzung der Erdatmosphäre und der anthropogenen Klimabeeinflussung befassen.

Der Förderschwerpunkt „Wirkung von UV-B-Strahlung“ ergänzt die ökosystemar angelegte Forschung, die von der Erfassung einer vom Menschen verursachten Veränderung über deren physikalische und chemische Folgereaktionen bis hin zu den biologischen Folgewirkungen führt. Er ist damit integraler Bestandteil des Umweltforschungsprogrammes des Bundesminister für Forschung und Technologie, dessen Kernpunkt die Untersuchung von Schadwirkungen, deren Ursachen und Vermeidung beziehungsweise Verminderung ist.

Die Auswirkungen einer erhöhten UV-B-Strahlung werden bereits seit Mitte der siebziger Jahre in der Bundesrepublik Deutschland in einer Reihe von Forschungsvorhaben untersucht. Aus diesen Forschungsvorhaben liegt eine Reihe von Ergebnissen vor, die die schädigende Wirkung von UV-B-Strahlung auf biologische Systeme belegen. Der überwiegende Teil davon ist unter Laborbedingungen und mit erhöhten Dosen erhalten worden. Notwendig sind darüber hinaus vor allem Untersuchungen unter Freilandbedingungen und die Kombinationswirkungen mit anderen Parametern wie Klimaänderungen und Umweltschadstoffen.

Nach der bisherigen Planung sollen im Rahmen des Förderschwerpunktes „Wirkungen von UV-B-Strahlung“ Vorhaben durchgeführt werden, die folgenden Hauptzielen zugeordnet sind:

- Erfassung und Quantifizierung der veränderten UV-B-Einstrahlung in Abhängigkeit von geographischer Breite und Zeit;
- Wirkung und Wirkungsmechanismen von erhöhter UV-B-Strahlung auf terrestrische und aquatische Fauna und Flora;
- Wirkung und Wirkungsmechanismen von erhöhter UV-B-Strahlung auf den Menschen.

Um diese Ziele zu erreichen, sind koordinierte und integrierte Forschungsansätze notwendig, die sowohl Laboruntersuchungen als auch Freilandexperimente beinhalten. Die einzelnen Forschungsvorhaben sollen den entsprechenden Themenschwerpunkten zugeordnet werden. Eine intensive Koordinierung innerhalb und zwischen den Schwerpunkten muß gewährleistet werden. Dazu ist ähnlich wie im Ozonforschungsprogramm an die Benennung eines Koordinators gedacht, der die Aufgabe hat, das Ministerium und seinen Projekträger bei der Koordinierung der Forschung zu beraten und zu unterstützen.

Die Wirkungsforschung in bezug auf eine erhöhte UV-B-Strahlung wurde bereits in einem früheren Förderschwerpunkt vom Bundesministerium für Forschung und Technologie gezielt unterstützt, so daß sich Arbeitsgruppen etablieren konnten, die mit großer Kompetenz erste grundlegende Arbeiten geleistet haben. Auf dieses Potential soll aufgebaut werden.

Ein Förderschwerpunkt dieses inhaltlichen Anspruchs kann nur in internationaler Kooperation erfolgreich sein, da der Umfang und die räumliche Verteilung der Forschung ein Land wie die Bundesrepublik allein überfordern würde. Es ist deshalb die Absicht dieses Förderschwerpunkts, im Rahmen von internationalen, und vor allem europäischen, Programmen einen eigenen nationalen Beitrag zu leisten.

**Zusatzvotum von den Kommissionsmitgliedern  
Dr. Knabe, Frau Prof. Ganseforth, Frau  
Dr. Hartenstein, Dr. Kübler, Müller (Düsseldorf),  
Prof. Dr. Hennicke zu Abschnitt D, 5. Kapitel  
„Maßnahmen zur FCKW- und  
Halonreduzierung“**

Die oben genannten Kommissionsmitglieder sehen hinsichtlich des Ausstiegs aus der Produktion der voll- und teilhalogenierten FCKW, der Halone, der FKW sowie von Tetrachlorkohlenstoff und Methylchloroform sofortigen Handlungsbedarf. Da zu befürchten ist, daß der Kabinettsbeschuß über die FCKW-Halonverordnung vom 30. 5. 1990 im Rahmen des EG-Verfahrens verzögert oder verhindert wird, ist eine entsprechende Verordnung in einem nationalen Alleingang umgehend in Kraft zu setzen.

Die oben genannten Kommissionsmitglieder empfehlen, in die Verordnung sämtliche teilhalogenierten FCKW sowie auch die klimawirksamen FKW aufzunehmen. Neben der Verwendung der in der Verordnung angesprochenen Stoffgruppen sind zeitgleich auch deren Produktion und Import zu regeln.

Vor der Verwendung der unter dem Aspekt des Klimaschutzes weniger bedenklichen chlorfreien Halogenkohlenwasserstoffe ist deren toxikologische Unbedenklichkeit sowie Umweltverträglichkeit zu überprüfen. Durch eine entsprechende Verordnung ist sicherzustellen, daß die FKW, die derzeit als Altstoffe nach dem Chemikaliengesetz geführt werden, einer Überprüfung im Sinne von Neustoffen unterzogen werden.

Die Kontrolle über das Einhalten der Reduktionsquoten, über die Produktions- und Verbrauchszahlen sowie die toxikologische und ökotoxikologische Bewertung der oben genannten Stoffe hat durch eine unabhängige Kommission zu erfolgen, die sich paritätisch aus Vertretern der Fachbehörden, Industrie und Umweltverbände zusammensetzt. Um ein effektives Arbeiten der Kommission zu ermöglichen – dies zeigte auch die eigene Arbeit der Enquete-Kommission –, ist es unerläßlich, daß die notwendigen Daten von der Chemischen Industrie erhoben und veröffentlicht werden.

## ABSCHNITT E

**Nationales Vorgehen zur Reduktion der Emissionen energiebedingter klimarelevanter Spurengase**

## 1. KAPITEL

## Ergebnisse, Handlungsempfehlungen und Forschungsbedarf

**1. Ergebnisse der Analysen zu den Minderungsmöglichkeiten der Emissionen klimarelevanter energiebedingter Spurengase bis zum Jahr 2005****Vorbemerkung**

Die nachstehende Analyse beruht auf einem ausführlichen Studienprogramm der Kommission (vgl. Kapitel 2 bis 6) und faßt die wesentlichen Ergebnisse der darauf aufbauenden Reduktionsszenarien zusammen.

Die Diskussionen in der Kommission haben deutlich gemacht, daß über die Durchführbarkeit einzelner Szenarien unterschiedliche Auffassungen bestehen.

Da sich der nationale Teil des Studienprogramms der Kommission auf das Gebiet der Bundesrepublik Deutschland ohne die ehemalige DDR bezieht, blieben Lage und Perspektive der ehemaligen DDR außerhalb der Untersuchung. Damit wurden auch die Binnenwanderungen und der Binnenhandel mit Energie über die bisherige deutsch-deutsche Grenze außer Betracht gelassen.

**1.1 Problemstellung und Zielsetzung**

Weltweit trägt der Energiebereich gegenwärtig zu 50 Prozent zum zusätzlichen Treibhauseffekt bei, zu rund 40 Prozent durch die Emission von CO<sub>2</sub> und zu rund 10 Prozent durch weitere energiebedingte Spurengase, insbesondere Methan (CH<sub>4</sub>), Stickoxide (NO<sub>x</sub>), Kohlenmonoxid (CO), flüchtige organische Verbindungen (ohne Methan, NMVOC) und Distickstoffoxid (N<sub>2</sub>O).

Im Jahr 1987 beliefen sich die energiebedingten CO<sub>2</sub>-Emissionen der Bundesrepublik Deutschland (ohne ehemalige DDR) auf eine Größenordnung von 715 Millionen Tonnen (einschließlich 10 Millionen Tonnen aus dem internationalen Luftverkehr). Damit trug die Bundesrepublik Deutschland (ohne ehemalige DDR) im Jahr 1987 mit 3,5 Prozent zu den weltweiten CO<sub>2</sub>-Emissionen in Höhe von rund 20,5 Milliarden Tonnen CO<sub>2</sub> bei.

Betrachtet man die Verteilung der CO<sub>2</sub>-Emissionen nach Sektoren, so zeigt sich, daß auf den Energieum-

wandlungsbereich (Stromerzeugung, Raffinerien etc.) 262 Millionen Tonnen CO<sub>2</sub> oder 36 Prozent der Emissionen entfielen. Daneben waren der Verkehr mit 20 Prozent, die Industrie mit 18 Prozent, die privaten Haushalte mit 16 Prozent, die Kleinverbraucher (Handwerk, Dienstleistungsbereich etc.) mit 9 Prozent und die sonstigen Emittentenbereiche mit 1 Prozent an den energiebedingten CO<sub>2</sub>-Emissionen beteiligt. Dabei ist zu berücksichtigen, daß die Emissionsreduktionen in diesen Bereichen nicht unabhängig voneinander gesehen werden können, da Energieeinsparungen im Endenergiebereich auch zu Energie- und Emissionsreduktionen im vorgelagerten Energieumwandlungsbereich führen.

Die Methan-Emissionen aus der Energie- und Abfallwirtschaft in der Bundesrepublik Deutschland (ohne ehemalige DDR) beliefen sich 1987 auf rund 2,6 Millionen Tonnen. Von diesen Emissionen entfielen nur 5 Prozent auf die Verbrennung der fossilen Energieträger, der überwiegende Teil wurde in den vorgelagerten Bereichen (Abfalldeponien, Steinkohlenbergbau, Erdgasverteilung) freigesetzt.

Die energiebedingten Emissionen von flüchtigen organischen Verbindungen (ohne Methan) betragen im Jahr 1987 etwa 1,5 Millionen Tonnen, die Stickoxidemissionen beliefen sich auf rund 2,6 Millionen Tonnen. Zur Zeit ist noch unklar, inwieweit Distickstoffoxid durch Energieaktivitäten in die Atmosphäre emittiert wird.

Um die Möglichkeiten und Konsequenzen der Minderung energiebedingter Treibhausgasemissionen beurteilen und darauf aufbauend Strategien und Maßnahmen zu ihrer Vermeidung und Reduktion ableiten zu können, hat die Enquete-Kommission ein Studienprogramm in Auftrag gegeben. Hier sollte geprüft werden, welchen Beitrag nach dem heutigen Stand des Wissens Energieeinsparung durch rationellere Energienutzung und Verminderung von Energiedienstleistungen, die Nutzung erneuerbarer Energiequellen, der Austausch fossiler Energieträger untereinander, die Nutzung der Kernenergie, Energiespeicher, neue Sekundärenergieträger und Nutzungssysteme, Entsorgungsmöglichkeiten von CO<sub>2</sub> und die konzeptionelle Fortentwicklung und Modernisierung des Verkehrsbereichs leisten können (vgl. 2. bis 6. Kapitel).



Der hier vorgelegte Bericht zeigt die Möglichkeiten der Emissionsminderung energiebedingter klimarelevanter Spurengase in drei verschiedenen Szenarien für die Bundesrepublik Deutschland (ohne ehemalige DDR) mit dem Zeithorizont 2005 auf. Damit werden Fakten und Grundlagen für die Ableitung von Maßnahmen zur Minderung energiebedingter Treibhausgase bereitgestellt.

## 1.2 Ergebnisse der Abschätzung der Einsparpotentiale für die Referenz-Entwicklung und die Reduktionsszenarien bis zum Jahr 2005

Im Studienprogramm der Enquete-Kommission wurden zunächst die technischen und wirtschaftlichen Potentiale zur Verminderung klimarelevanter energiebedingter Emissionen analysiert und – soweit möglich – ihre Kosten angegeben (vgl. Kapitel 4). Die einzelnen Handlungsmöglichkeiten („Rationelle Energieverwendung“, „Erneuerbare Energiequellen“, „Substitution durch Erdgas und durch Kernenergie“ etc.) sowie organisatorische und politische Optio-

nen im Verkehrsbereich wurden zunächst weitgehend unabhängig voneinander bearbeitet. Ein gemeinsames „Analyseraster“ mit gemeinsam vereinbarten Rahmenannahmen ermöglichte zunächst einen Bezugsrahmen (vgl. Tab. 1), aber es ist bei der Vielfalt der technischen Emissionsminderungsmöglichkeiten offensichtlich, daß einzelne jeweils ausgewiesene Potentiale, zum Beispiel der Stromersparung und der Stromerzeugung mittels nicht-erneuerbarer emissionsarmer Energiequellen, nicht einfach addiert werden können. Auch können in der Praxis nicht alle Potentiale zugleich zum Zuge kommen. Deshalb war es notwendig, einzelne Potentiale aus den einzelnen Optionen in technisch möglichst widerspruchs- und überschneidungsfreie „Potentialpakete“, die im folgenden als „Szenarien“ bezeichnet werden, mit einem Zeithorizont bis zum Jahr 2005 zusammenzufügen (vgl. Abb. 1 sowie Kapitel 5). Nicht untersucht wurde, inwieweit die Rahmendaten des Analyserasters sowie die entwickelten Szenarien mit den Bestimmungen und Auswirkungen des Europäischen Binnenmarktes vereinbar sind. Das trifft insbesondere auf die Energiepreise, auf Steuern und Abga-

Tabelle 1

### Einige Rahmenannahmen des gemeinsamen „Analyserasters“ der Untersuchungen zu den technischen Optionen der Emissionsminderung <sup>1)</sup>

exogene Variable	1987	1995	2005
Bevölkerung (in Mio.)	61,3	61,7	60,0
Wohnfläche (in Mio. m <sup>2</sup> )	2 040	2 160	2 270
Wachstum des Welthandels	4,0 %/a	4,0 %/a	
Wachstum des BIP	2,5 %/a	2,3 %/a	
Wachstum der industriellen Nettoproduktion	2,4 %/a	2,1 %/a	
Verkehrsleistungen			
– Personenverkehr Trend (Mrd. Personenkilometer)	750	k. A.	965
– Güterverkehr (Mrd. km)	268	k. A.	369
Ölimportpreis (DM 1987/GJ)	5,90	6,40	9,00
Steinkohleimportpreis (DM 1987/GJ)	3,00	3,70	4,70
	DM/GJ	Veränderungen 1987–2005	DM/GJ
Brennstoffe für private Haushalte			
– Erdgas	15,30	35 %	20,60
– leichtes Heizöl	10,50	60 %	17,10
Strom für private Haushalte (Pf/kWh)	28,7	4 %	29,8
Brennstoffe für die Industrie			
– Erdgas	7,30	50 %	10,90
– leichtes Heizöl	9,30	55 %	14,40
– schweres Heizöl	5,80	50 %	8,80
Strom für die Industrie (Pf/kWh)	24,0	±0 %	24,0

<sup>1)</sup> Die Enquete-Kommission betrachtet diese Annahmen als methodischen Schritt zur Ermittlung möglicher Reduktionspotentiale, das heißt, sie identifiziert sich nicht automatisch mit diesen Annahmen. Sie behält sich daher vor, das Analyseraster für ihre Schlußfolgerungen und zur Konzipierung geeigneter Maßnahmen zu modifizieren.

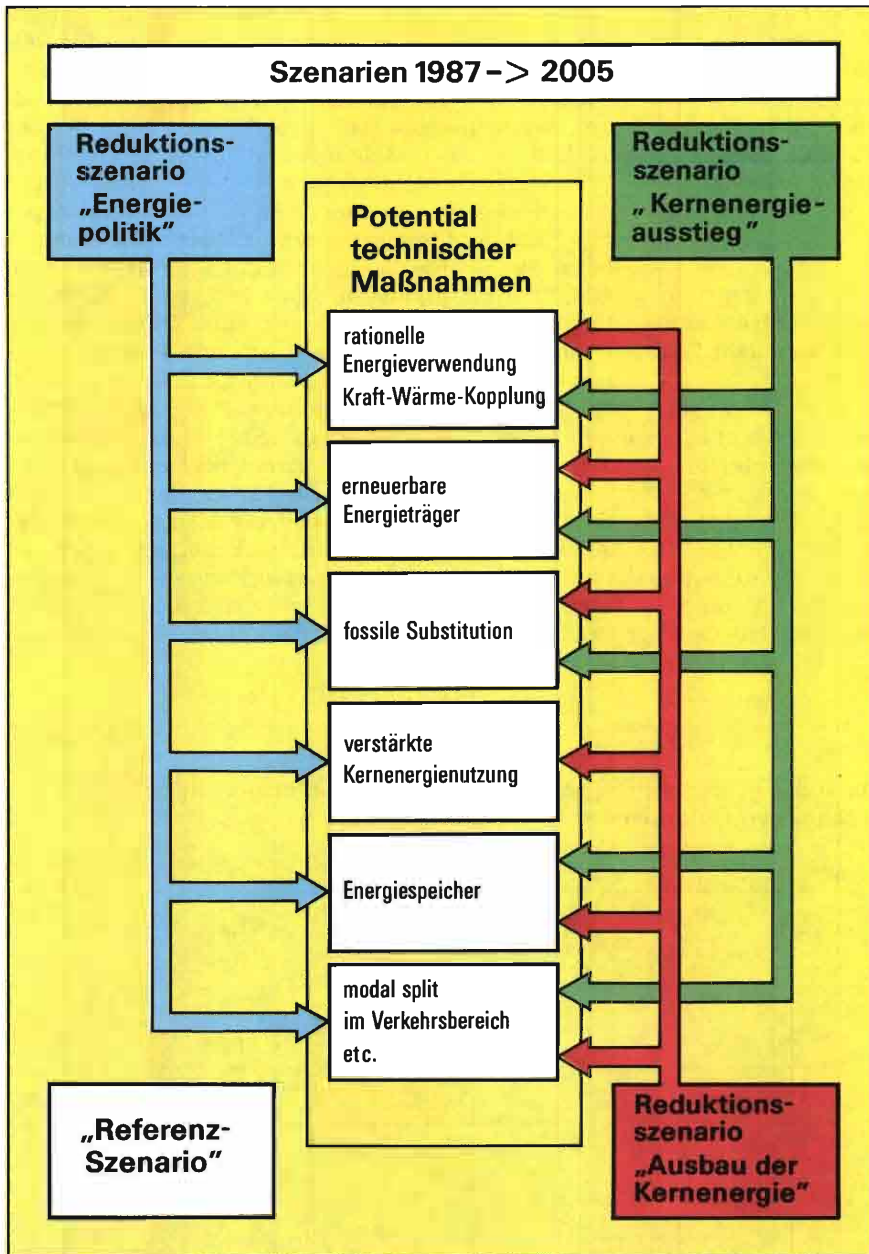


Abb. 1: Schema der Komposition der Ergebnisse der Untersuchungen über die Minderungspotentiale zu drei Szenarien für das Jahr 2005

ben auf Energie oder CO<sub>2</sub>-Emissionen, auf die Wirkung des freien Warenverkehrs innerhalb des gemeinsamen Marktes und auf den Energieaußenhandel zu.

Die Enquete-Kommission wählte neben einer Referenz-Entwicklung drei energiepolitische Reduktionsszenarien bis zum Jahr 2005 aus, in denen die Vorgabe war,

- die heutige Kernkraftwerks-Kapazität zu erhalten (Reduktionsszenario „Energiepolitik“),
- die Kernkraftwerke bis zum Jahr 1995 beziehungsweise 2005 stillzulegen (Reduktionsszenario „Ausstieg aus der Kernenergie“)

- oder die Kernkraftwerke weiter auszubauen (Reduktionsszenario „Ausbau der Kernenergie“).

Alle drei Szenarien orientierten sich an der Zielvorgabe, etwa 30 Prozent Verminderung an CO<sub>2</sub>-Emissionen bis zum Jahr 2005 zu erreichen.

### 1.2.1 Die Referenz-Entwicklung

Die Referenz-Entwicklung beruht auf der jüngsten Energiebedarfsprognose, die im Jahre 1988/89 für die Bundesregierung erstellt wurde. Diese Prognose wurde unabhängig von den Arbeiten für die Enquete-Kommission erstellt, die ab Sommer 1989 entstanden,

und über die in Kap. 4 berichtet wird. Die Energiebedarfsprognose stellt – auftragsgemäß – diejenige energiewirtschaftliche und -politische Entwicklung dar, die im Frühjahr 1989 als die „wahrscheinlichste“ von den Autoren angesehen wurde, wenn keine besonders gravierenden Eingriffe vorgenommen werden. Die Annahmen dieser Prognose sind größtenteils mit den Annahmen des Analyserasters (vgl. Tab. 1) identisch. Wesentliche Ausnahmen wurden zur Energiepreisentwicklung und zur Verkehrsentwicklung getroffen. In der Referenz-Entwicklung wurden – im Gegensatz zum Analyseraster – umwelt- und klimapolitisch begründete Energiesteuern oder -abgaben, linear um 15 beziehungsweise 20 Prozent ansteigend, für die Jahre 2005 und 2010 unterstellt. Die Verkehrsentwicklung der Referenz-Entwicklung enthält keine Zahlen zum stark expandierenden internationalen Flugverkehr.

Die Referenz-Entwicklung kommt zu dem Ergebnis, daß trotz eines unterstellten Wirtschaftswachstums von kumuliert rund 50 Prozent der Primärenergiebedarf der Bundesrepublik Deutschland (ohne ehemalige DDR) im Jahr 2005 nicht höher ausfällt als derjenige im Jahr 1987 (rd. 11350 PJ).

Die CO<sub>2</sub>-Emissionen nehmen wegen einer um 28 Prozent gesteigerten Nutzung von Naturgas (2005: gut 2400 PJ) und der erneuerbaren Energiequellen (Zuwachs: 40 Prozent auf 415 PJ) sowie einer besseren Auslastung der Kernkraftwerke auf rd. 695 Millionen Tonnen ab. Die Substitutionen gehen zu Lasten der Mineralölprodukte (minus 11 Prozent) sowie der Stein- und Braunkohlen (beide: minus 15 Prozent). Die Emissionen von Stickoxiden und die flüchtigen organischen Verbindungen (ohne Methan) nehmen infolge der bereits geltenden Umweltgesetzgebung bei stationären Anlagen und der Katalysatornutzung im PKW um 60 Prozent beziehungsweise knapp 70 Prozent ab.

### 1.2.2 Reduktionsszenario „Energiepolitik“

#### – „Hemmnisabbau“ (1. Stufe)

Das Reduktionsszenario „Energiepolitik“ wurde analytisch in zwei Stufen gegliedert:

In der ersten Stufe wurde unterstellt, daß die wesentlichen Hemmnisse, die der rationellen Energieverwendung und der Nutzung erneuerbarer Energiequellen entgegenstehen, abgebaut werden. Allerdings werden keine Investitionsanreize durch die öffentliche Hand gegeben und keine Steuern oder Abgaben erhoben. Der Abbau dieser Hemmnisse, der auch Bestandteil der Reduktionsszenarien „Kernenergieausstieg“ und „Ausbau der Kernenergie“ ist, wird im folgenden als Stufe 1 bezeichnet.

Die hiermit verbundenen Maßnahmen umfassen nicht nur den Einsatz energiepolitischer Instrumente durch den Staat, sondern auch viele Initiativen der Selbstorganisationen der Wirtschafts- und Energieversorgungsunternehmen sowie verkehrs- und siedlungspolitische Instrumente.

Die Entwicklung in Stufe 1 (Hemmnisabbau) führt zu dem Ergebnis, daß der gesamte Energieverbrauch im

Jahr 2005 um 688 Petajoule (PJ), das heißt etwa 6,5 Prozent, gegenüber 1987 sinkt. Dieser Schritt führt zusammen mit dem Ausbau sowohl der erneuerbaren Energien (Zunahme um 181 PJ) als auch des Einsatzes von Gasen (Zunahme um 519 PJ) und durch eine bessere Auslastung der bestehenden Kernkraftwerkskapazität (Zunahme um 217 PJ) zu einem Absinken der CO<sub>2</sub>-Emissionen um 16,5 Prozent auf 597 Millionen Tonnen.

Diese Entwicklung geht zu Lasten der Mineralölprodukte (minus 1043 PJ), der Steinkohle (minus 388 PJ) und der Braunkohle (minus 227 PJ).

Die Emissionen von Stickoxiden und flüchtigen organischen Verbindungen (ohne Methan) nehmen um 51,8 Prozent beziehungsweise 82 Prozent ab, die Methanemissionen sinken um 29,5 Prozent.

Die Investitionssumme der in Stufe 1 (Hemmnisabbau) vorgenommenen Maßnahmen beläuft sich auf etwa 160 Milliarden DM. Hiermit verbunden ist bei den angenommenen Energiepreiserhöhungen ohne Preispolitik (vgl. Tabelle 1) eine jährliche Einsparung von knapp 2 Milliarden DM.

#### – „Energiepolitik“ (2. Stufe)

Als methodisches Hilfsmittel wurden in einer zweiten Stufe auch preispolitische Maßnahmen für Endenergieträger unterstellt (als Preiserhöhung zum Beispiel für Brennstoffe und Fernwärme: 5,- DM/GJ und für Strom 2 DPf/KWh) beziehungsweise finanzielle Anreizprogramme für Investitionen zur rationellen Energiegenutzung und Anwendung erneuerbarer Energiequellen angenommen.

In Tabelle 2 werden die mit der zweiten Stufe (Energiepolitik) verbundenen Maßnahmen aufgezeigt. Durch rationellere Energieverwendung reduziert sich der Endenergiebedarf – trotz zunehmender Wohnflächen (um 10 Prozent) und zunehmender Verkehrsleistungen (um 30 Prozent) sowie wirtschaftlichen Wachstums (plus 50 Prozent) – um gut 870 PJ. Die Nutzung der erneuerbaren Energiequellen im Endenergiebereich vermindert den Bedarf an konventionellen Energieträgern um 310 PJ. Der gegenüber dem Status-quo-Trend vermehrte Erdgaseinsatz zulasten der Kohle und des Heizöls führt zu einer Einsparung von 15 PJ. Zusätzlich werden die Brennstoffmengen im Endenergiebereich durch Wärmebereitstellung aus fossil und mit Biomasse gefeuerten Kraft-Wärme-Kopplungsanlagen in Höhe von rund 300 PJ entlastet. Insgesamt geht der Endenergieverbrauch bis 2005 um 1200 PJ, das heißt um fast 16 Prozent gegenüber 1987 zurück.

Tabelle 3 zeigt den gesamten Energieverbrauch nach Energieträgern unterteilt. Der Bedarf an fossilen Energieträgern reduziert sich um 2170 PJ (24 Prozent) bis zum Jahre 2005. Allerdings nehmen die Mineralölprodukte mit 1500 PJ (37 Prozent) und die Kohlen mit 1120 PJ (39 Prozent) überdurchschnittlich ab, während Erdgas mit 460 PJ noch um gut 20 Prozent zunimmt (vgl. Tab. 3). Der Steinkohlebedarf liegt im Jahre 2005 bei 40 Millionen Tonnen SKE. Insgesamt geht bis zum Jahre 2005 der Anteil der fossilen Energieträger von 85,3 Prozent auf 77,8 Prozent zurück, bezogen auf den gesamten Energieverbrauch einschließlich der erneuerbaren Energiequellen, aber

Tabelle 2

**Zusammenstellung der emissionsmindernden Maßnahmen in den Endenergiesektoren und im Kraft-Wärme-Kopplungs-Bereich für das Reduktionsszenario „Energiepolitik“**

in Petajoule (PJ)

	Energieverbrauch 1987	Änderungen im Jahr 2005 gegenüber 1987 durch			Energieverbrauch 2005 <sup>8)</sup>
		rationelle Energie- verwendung	erneuerbare Energie- quellen <sup>2)</sup>	Substitution fossiler Energien <sup>6)</sup>	
Private Haushalte <sup>1)</sup> .....	2 034	-684	-149	- 4	1 197
Kleinverbraucher .....	1 225	-155	-140	- 4	926
Industrie <sup>3)</sup> .....	2 289	+181	- 21	- 7	2 442
Verkehr <sup>4)</sup> .....	1 991	-210	0	0	1 781
nicht behandelt <sup>5)</sup> .....	123	- 3	0	0	120
<b>Summe Endenergie .....</b>	<b>7 662</b>	<b>-871</b>	<b>-310</b>	<b>-15</b>	<b>6 466</b>
<b>Kraft-Wärme-Kopplung (KWK):</b>					
– Industrie .....	245	198	0	- 7	436
– Heizkraftwerke .....	254	285	110 <sup>7)</sup>	k. A.	539
– Summe KWK .....	499	483	110 <sup>7)</sup>	- 7	975

<sup>1)</sup> Raumwärme temperaturbereinigt auf Normaljahr

<sup>2)</sup> durch erneuerbare Energiequellen substituierte Brennstoffmengen

<sup>3)</sup> inklusive Brennstoffe für eigenerzeugten und selbstverbrauchten Strom

<sup>4)</sup> inklusive Treibstoffe für internationalen Flugverkehr (1987: 120 PJ)

<sup>5)</sup> dezentrale Warmwasserversorgung mit Holz und Gas, Kraft und Treibstoffe für Militär und Landwirtschaft, Strom für Wärme im Verkehr, sonstiger Strom von Kleingeräten im Haushalt

<sup>6)</sup> Minderverbrauch (netto) durch verstärkten Erdgaseinsatz

<sup>7)</sup> substituierte Brennstoffe im Endenergiesektor und bereitgestellter Strom aus biomassengefeuerter KWK; in Summe nicht berücksichtigt

<sup>8)</sup> nicht enthalten sind die erneuerbaren Energiequellen

**Gesamter Energieverbrauch, unterteilt nach Energieträgern<sup>1)</sup>, für die Bundesrepublik Deutschland  
(ohne ehemalige DDR) im Reduktionsszenario „Energiepolitik“  
in Petajoule (PJ)**

Energieträger	1987 Basisjahr		Reduktionsszenario Energiepolitik im Jahr 2005		
	PJ	Anteil in %	PJ	Veränderung in %	Anteil in %
Steinkohlen .....	1 878	17,4	1 155	-38,5	12,4
Braunkohlen .....	1 016	9,4	617	-39,3	6,6
Mineralölprodukte .....	4 060	37,6	2 552	-37,1	27,5
Gase .....	2 250	20,9	2 709	20,4	29,2
<b>Summe fossile Energieträger .....</b>	<b>9 204</b>	<b>85,3</b>	<b>7 033</b>	<b>-23,6</b>	<b>75,7</b>
Wasserkraft .....	184	1,7	220	19,6	2,4
Kernenergie .....	1 233	11,4	1 428	15,8	15,3
Windenergie .....	0	0	43	-	0,5
Photovoltaik .....	0	0	5	-	0,1
Stromimportsaldo etc. ....	36	0,3	36	0,0	0,4
erneuerbare Energiequellen im Endenergiebereich .....	135	1,3	523	287,4	5,6
<b>Zwischensumme<sup>2)</sup> .....</b>	<b>10 792</b>	<b>100,0</b>	<b>9 288</b>	<b>-13,9</b>	<b>100,0</b>
Reduktion durch einergiebewußtes Verhalten gegenüber 1987 <sup>3)</sup> .....			-540	-5,0	
<b>Gesamtsumme<sup>2)</sup> .....</b>	<b>10 792</b>	<b>100,0</b>	<b>8 748</b>	<b>-18,9</b>	

<sup>1)</sup> Abweichungen vom Primärenergieverbrauch durch Nichtberücksichtigung des nichtenergetischen Verbrauchs, des sonstigen Energieaußenhandels etc.

<sup>2)</sup> bewertet mit den substituierten Energieträgern.

<sup>3)</sup> Die Kommission verzichtet auf eine szenariospezifische Differenzierung des Beitrags durch energiebewußtes Verhalten und setzt bei allen Szenarien pauschal 5 Prozent des jeweiligen Wertes des Jahres 1987 an.

Tabelle 3b

**Gesamter Energieverbrauch, unterteilt nach Energieträgern <sup>1)</sup>, für die Bundesrepublik Deutschland  
(ohne ehemalige DDR) im Reduktionsszenario „Energiepolitik“  
in Mio. Tonnen SKE**

Energieträger	1987 Basisjahr		Reduktionsszenario Energiepolitik im Jahr 2005		
	Mio. t SKE	Anteil in %	Mio. t SKE	Veränderung in %	Anteil in %
Steinkohlen .....	64,1	17,4	39,4	-38,5	12,4
Braunkohlen .....	34,7	9,4	21,1	-39,3	6,6
Mineralölprodukte .....	138,4	37,6	87,1	-37,1	27,5
Gase .....	76,8	20,9	92,4	20,4	29,2
<b>Summe fossile Energieträger .....</b>	<b>314,0</b>	<b>85,3</b>	<b>240,0</b>	<b>-23,6</b>	<b>75,7</b>
Wasserkraft .....	6,3	1,7	7,5	19,6	2,4
Kernenergie .....	42,1	11,4	48,7	15,8	15,3
Windenergie .....	0,0	0	1,5	—	0,5
Photovoltaik .....	0,0	0	0,2	—	0,1
Stromimportsaldo etc. ....	1,2	0,3	1,2	0,0	0,4
erneuerbare Energiequellen im Endenergiebereich .....	4,6	1,3	17,8	287,4	5,6
<b>Zwischensumme <sup>2)</sup> .....</b>	<b>368,2</b>	<b>100,0</b>	<b>316,9</b>	<b>-13,9</b>	<b>100,0</b>
Reduktion durch energiebewußtes Verhalten gegenüber 1987 <sup>3)</sup> .....			-18,4	-5,0	
<b>Gesamtsumme <sup>2)</sup> .....</b>	<b>368,2</b>	<b>100,0</b>	<b>298,5</b>	<b>-18,9</b>	

<sup>1)</sup> Abweichungen vom Primärenergieverbrauch durch Nichtberücksichtigung des nichtenergetischen Verbrauchs, des sonstigen Energieaußenhandels etc.

<sup>2)</sup> bewertet mit den substituierten Energieträgern.

<sup>3)</sup> Die Kommission verzichtet auf eine szenariospezifische Differenzierung des Beitrags durch energiebewußtes Verhalten und setzt bei allen Szenarien pauschal 5 Prozent des jeweiligen Wertes des Jahres 1987 an.

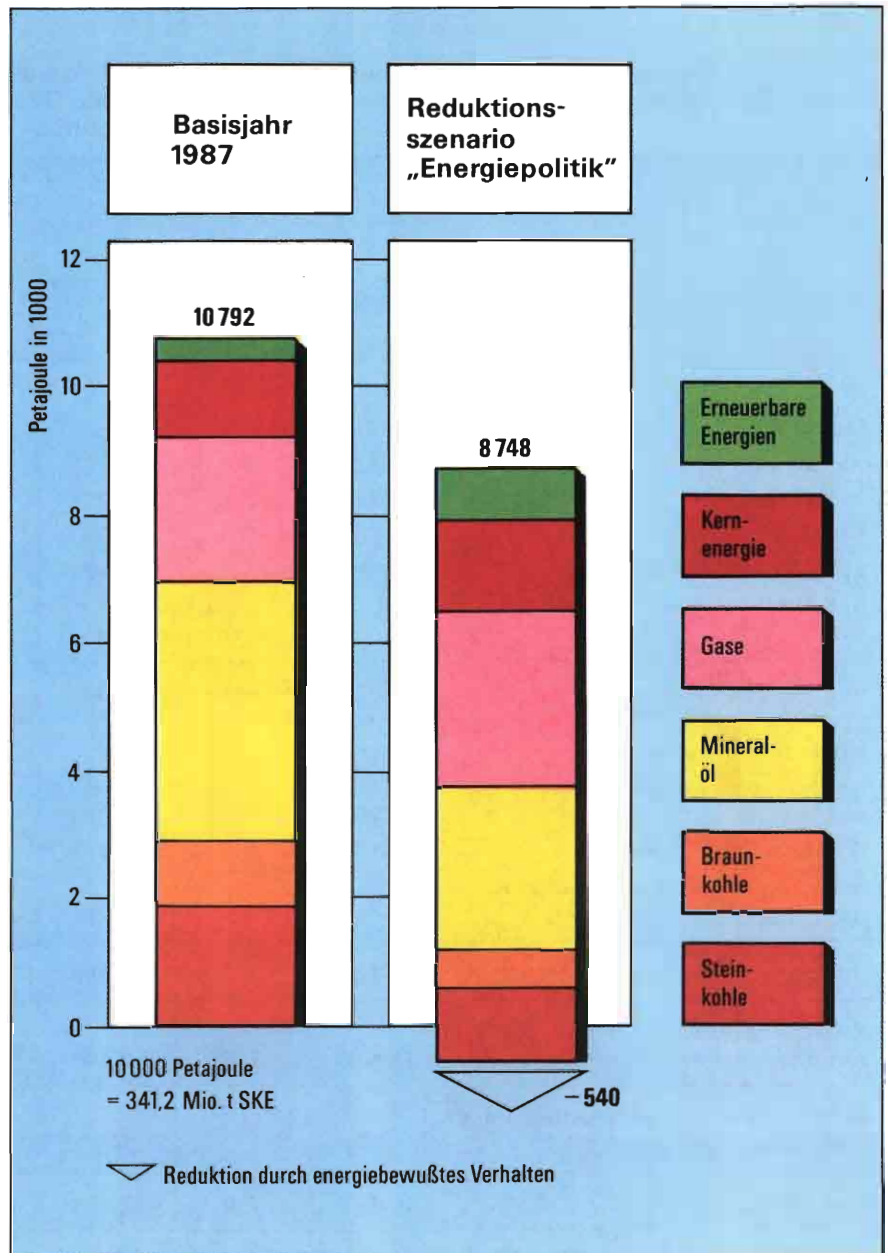


Abb. 2: Entwicklung des Energieverbrauchs, unterteilt nach Energieträgern, für die Bundesrepublik Deutschland (ohne ehemalige DDR) bis zum Jahr 2005 im Reduktionsszenario „Energiepolitik“

ohne Berücksichtigung der Energieeinsparung durch energiebewußtes Verhalten. Möglich ist dies durch die Zunahme der Kernenergie, der Wasserkraft und der sonstigen erneuerbaren Energiequellen.

Unter Einschluß der Reduktion durch energiebewußtes Verhalten können die CO<sub>2</sub>-Emissionen in dem hier skizzierten Reduktionsszenario bis zum Jahr 2005 um rund 241 Millionen Tonnen, also gegenüber 1987 um 33,7 Prozent, gesenkt werden (vgl. Tab. 4).

Hierbei vermindern sich die Emissionen im Endenergiebereich um 120 Millionen Tonnen CO<sub>2</sub> (26,5 Prozent), wobei insbesondere im Haushaltsbereich und – mit etwas Abstand – im Kleinverbrauch die höchsten Reduktionspotentiale mobilisiert werden kön-

nen. Demgegenüber sinken die Emissionen in den Sektoren Industrie und Verkehr deutlich geringer, was unter anderem Ausdruck des angenommenen Wirtschaftswachstums sowie des erheblichen Anstiegs der Verkehrsleistungen ist.

Im gesamten Umwandlungssektor gehen die CO<sub>2</sub>-Emissionen um 85 Millionen Tonnen (32,4 Prozent) zurück. Der Ausbau der Kraft-Wärme-Kopplung führt zwar zu einer Erhöhung der CO<sub>2</sub>-Emissionen in diesem Sektor um 26 Millionen Tonnen (57,7 Prozent). Durch diesen Ausbau werden jedoch im Endenergiebereich 20 Millionen Tonnen CO<sub>2</sub> und in der sonstigen Stromerzeugung 36 Millionen Tonnen CO<sub>2</sub> vermieden. In der sonstigen Stromerzeugung ergibt sich dadurch, verbunden mit den übrigen Maßnahmen in

Tabelle 4 a

**Verbrauch von fossilen Energieträgern und Kernbrennstoffen in Petajoule (PJ)  
sowie CO<sub>2</sub>-Emissionen in Millionen Tonnen für die Bundesrepublik Deutschland (ohne ehemalige DDR)  
im Reduktionsszenario „Energiepolitik“**

	Basisjahr 1987		Reduktionsszenario Energiepolitik im Jahr 2005			
	Brennstoffe PJ	CO <sub>2</sub> -Emissionen Mio. t	Brennstoffe PJ	Mio. t	CO <sub>2</sub> -Emissionen	
					Mio. t	%
<b>Endenergiesektoren:</b>						
Haushalte .....	1 615	113	873	52	- 61	-54,0
Kleinverbrauch .....	870	60	605	36	- 24	- 4,0
Industrie 1) .....	1 782	131	1 833	127	- 4	- 3,1
Verkehr .....	1 961	143	1 732	129	- 14	- 9,8
nicht behandelte Sektoren .....	83	6	74	9	3	
Substitution durch Kraft-Wärme-Kopplung .....	0		-309	-20	- 20	
<b>Summe Endenergiesektoren .....</b>	<b>6 311</b>	<b>453</b>	<b>4 808</b>	<b>333</b>	<b>-120</b>	<b>-26,5</b>
<b>Umwandlungssektoren:</b>						
Kraft-Wärme-Kopplung und Heizwerke .....	499	45	975	71	26	57,8
Sonstige Stromerzeugung .....	3 185	189	2 432	94	- 95	-50,3
Sonstige Umwandlungssektoren und statistische Differenzen .....	442	28	281	12	- 16	
<b>Summe Umwandlungssektoren ...</b>	<b>4 126</b>	<b>262</b>	<b>3 688</b>	<b>177</b>	<b>- 85</b>	<b>-32,4</b>
<b>Zwischensumme Endenergiesektoren und Umwandlungsbereich ...</b>	<b>10 437</b>	<b>715</b>	<b>8 496</b>	<b>510</b>	<b>-205</b>	<b>-28,7</b>
Reduktion durch energiebewußtes Verhalten gegenüber 1987 2) .....			-522		- 36	- 5
<b>Gesamtsumme .....</b>	<b>10 437</b>	<b>715</b>	<b>7 974</b>	<b>474</b>	<b>-241</b>	<b>-33,7</b>

1) Inklusive Brennstoffeinsatz und -emissionen für eigenerzeugten und selbstverbrauchten Strom

2) Die Kommission verzichtet auf eine szenariospezifische Differenzierung des Beitrags durch energiebewußtes Verhalten und setzt bei allen Szenarien pauschal 5 Prozent des jeweiligen Wertes des Jahres 1987 an.

diesem Sektor, eine Reduktion der CO<sub>2</sub>-Emissionen um 95 Millionen Tonnen (50,3 Prozent) gegenüber 1987.

Hinzu kommen die Auswirkungen eines energiebewußteren Verhaltens sowie eines freiwilligen Verzichts auf die Inanspruchnahme von Energiedienstleistungen. Die Kommission verzichtet hierbei auf eine szenariospezifische Differenzierung des Beitrages durch energiebewußtes Verhalten und setzt bei allen Reduktionsszenarien eine addierbare Reduktion der CO<sub>2</sub>-Emissionen um pauschal 5 Prozent gegenüber

1987 an, so daß sich eine Gesamtreduktion um 33,7 Prozent ergibt.

Die Methan-Emissionen aus dem Energiebereich reduzieren sich um 35 Prozent, wobei ein erheblicher Rückgang auf die allgemeine Annahme zurückzuführen ist, daß 350 000 Tonnen Methan (CH<sub>4</sub>) durch freiwillige Vereinbarungen mit dem Steinkohlenbergbau reduziert werden können. Die Emissionen der flüchtigen organischen Verbindungen (ohne Methan) nehmen um gut 80 Prozent und die der Stickoxide (NO<sub>x</sub>) um 55 Prozent ab. Dieser Rückgang wird zusätzlich



Tabelle 4 b

**Verbrauch von fossilen Energieträgern und Kernbrennstoffen in Millionen Tonnen SKE  
sowie CO<sub>2</sub>-Emissionen in Millionen Tonnen für die Bundesrepublik Deutschland (ohne ehemalige DDR)  
im Reduktionsszenario „Energiepolitik“**

	Basisjahr 1987		Reduktionsszenario Energiepolitik im Jahr 2005				
	Brennstoffe	CO <sub>2</sub> -Emissionen	Brennstoffe	CO <sub>2</sub> -Emissionen			
				Mio. t SKE	Mio. t	Reduktion in	
						Mio. t	Mio. t
<b>Endenergiesektoren:</b>							
Haushalte .....	55,1	113	29,8	52	- 61	-54,0	
Kleinverbrauch .....	29,7	60	20,6	36	- 24	- 4,0	
Industrie 1) .....	60,8	131	62,5	127	- 4	- 3,1	
Verkehr .....	66,9	143	59,1	129	- 14	- 9,8	
nicht behandelte Sektoren .....	2,8	6	2,5	9	3		
Substitution durch Kraft-Wärme-Kopplung .....	0,0		-10,5	-20	- 20		
<b>Summe Endenergiesektoren .....</b>	<b>215,3</b>	<b>453</b>	<b>164,0</b>	<b>333</b>	<b>-120</b>	<b>-26,5</b>	
<b>Umwandlungssektoren:</b>							
Kraft-Wärme-Kopplung und Heizwerke .....	17,0	45	33,3	71	26	57,8	
Sonstige Stromerzeugung .....	108,7	189	83,0	94	- 95	-50,3	
Sonstige Umwandlungssektoren und statistische Differenzen .....	15,1	28	9,6	117,02	- 16		
<b>Summe Umwandlungssektoren ...</b>	<b>140,8</b>	<b>262</b>	<b>125,9</b>	<b>177</b>	<b>- 85</b>	<b>-32,4</b>	
<b>Zwischensumme Endenergiesektoren und Umwandlungsbereich .....</b>	<b>356,1</b>	<b>715</b>	<b>289,9</b>	<b>510</b>	<b>-205</b>	<b>-28,7</b>	
Reduktion durch energiebewußtes Verhalten gegenüber 1987 2) .....			-17,8		- 36	- 5	
<b>Gesamtsumme .....</b>	<b>356,1</b>	<b>715</b>	<b>272,1</b>	<b>474</b>	<b>-241</b>	<b>-33,7</b>	

1) Inklusive Brennstoffeinsatz und -emissionen für eigenerzeugten und selbstverbrauchten Strom

2) Die Kommission verzichtet auf eine szenariospezifische Differenzierung des Beitrags durch energiebewußtes Verhalten und setzt bei allen Szenarien pauschal 5 Prozent des jeweiligen Wertes des Jahres 1987 an.

zum verminderten Energieeinsatz fossiler Energieträger durch die laufende und absehbare Umweltschutzgesetzgebung erreicht.

Kostenabschätzungen waren für die Raumwärme in privaten Haushalten und Kleinverbrauch, die Elektrogeräte, die Kraft-Wärme-Kopplung und Fernwärme, die erneuerbaren Energiequellen sowie für die Substitution durch Gas und die Kernenergie verfügbar. In der Energiepolitik-Variante betragen die Investitionen zwischen 1987 und 2005 für diese Bereiche 325 Milliarden DM, das heißt rund 18 Milliarden DM pro Jahr.

Die jährlichen Nettokosten für diese Energieverbrauchsgebiete, das heißt die Differenz zwischen den gesamten Zusatzkosten (den Kapital-, Personal-, Wartungs- und sonstigen Kosten) und den eingesparten Energiekosten wurden auf der Basis der Preisentwicklung ohne preispolitische Maßnahmen berechnet (vgl. Tabelle 1). Sie summieren sich auf zusätzliche Kosten von 2,7 Milliarden DM pro Jahr, wobei die Ersparnisse des „Hemmnisabbaus“ bereits verrechnet sind. Diese Werte entsprechen in der Energiepolitik-Variante jährlichen pro-Kopf-Kosten von 45,50 DM.

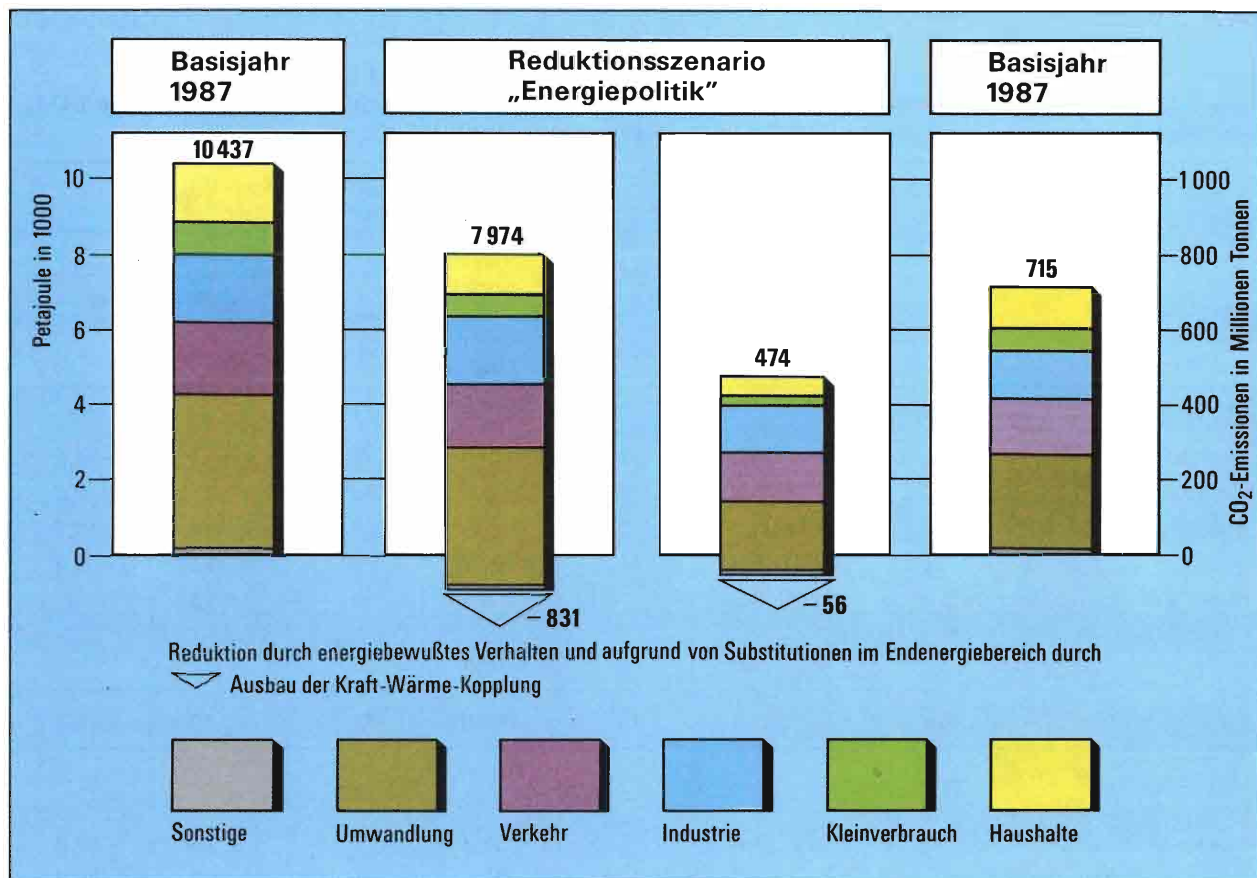


Abb. 3: Entwicklung des Verbrauchs von fossilen Energieträgern und Kernbrennstoffen sowie CO<sub>2</sub>-Emissionen für die Bundesrepublik Deutschland (ohne ehemalige DDR) bis zum Jahr 2005 im Reduktionsszenario „Energiepolitik“

Zusammen mit den nicht kostenmäßig erfaßten Sektoren (Warmwasser, Industrie und prozeßwärmeintensive Bereiche des Kleinverbrauchs sowie Verkehr) dürften die Nettokosten der Energiepolitik-Variante insgesamt jährlich bei gut 5 Milliarden DM liegen, das heißt bei weniger als 100,- DM pro Kopf im Jahre 2005 (zum Vergleich; das Bruttoinlandsprodukt pro Kopf liegt im Jahr 2005 nach den zugrunde gelegten Annahmen um 17 800 DM pro Kopf höher als 1987).

Insgesamt läßt sich feststellen, daß bei den vorgenannten Rahmenannahmen und der angenommenen Komposition der technischen Maßnahmen des Szenarios eine Verminderung der CO<sub>2</sub>-Emissionen um über 30 Prozent realisierbar ist, wenn die Energiepolitik einschließlich der Verkehrspolitik in dem skizzierten erheblichen Umfang die bestehenden Möglichkeiten ausschöpft. Die Nettokosten belaufen sich im Jahre 2005 im Durchschnitt auf 100,- DM pro Kopf, ein angesichts der Zunahme des Bruttoinlandsprodukts pro Kopf von 32 832 DM pro Kopf im Jahr 1987 um 17 800 DM pro Kopf auf 50 632 DM pro Kopf im Jahr 2005 vergleichsweise geringer Betrag dafür, die Entkopplung von Wirtschaftswachstum und klimarelevanten Emissionen in dem erforderlichen Umfang zu realisieren.

### 1.2.3 Reduktionsszenario „Ausstieg aus der Kernenergie“

In der Variante „Kernenergieausstieg“ wurden die Implikationen eines bis spätestens zu den Jahren 2005 beziehungsweise 1995 zu vollziehenden Ausstiegs aus der Kernenergie untersucht. Dabei sollte nach Vorgaben der Enquete-Kommission ein Szenario beschrieben werden, daß im Jahr 2005 im Resultat zu derselben Reduktion der CO<sub>2</sub>-Emissionen führt wie in der Energiepolitik-Variante, um die Vergleichbarkeit der notwendigen Maßnahmen sicherzustellen.

Um das Ziel einer derartigen Reduktion der CO<sub>2</sub>-Emissionen mit der Beendigung der Kernenergienutzung zu verbinden, werden im Vergleich zum Reduktionsszenario „Energiepolitik“

- die Möglichkeiten der rationellen Energieverwendung noch stärker ausgeschöpft,
- der Einsatz erneuerbarer Energiequellen erheblich beschleunigt,
- die Kraft-Wärme-Kopplung zusätzlich ausgeweitet,

**Zusammenstellung der emissionsmindernden Maßnahmen in den Endenergiesektoren und im Kraft-Wärme-Kopplungs-Bereich für das Reduktionsszenario „Kernenergieausstieg 2005“**

in Petajoule (PJ)

	Energieverbrauch 1987	Änderungen im Jahr 2005 gegenüber 1987 durch			Energieverbrauch 2005 <sup>8)</sup>
		rationelle Energieverwendung	erneuerbare Energiequellen <sup>2)</sup>	Substitution fossiler Energien <sup>6)</sup>	
Private Haushalte <sup>1)</sup> .....	2 034	– 801	–294	– 3	937
Kleinverbraucher .....	1 225	– 237	–291	– 6	691
Industrie <sup>3)</sup> .....	2 289	22	– 43	–13	2 255
Verkehr <sup>4)</sup> .....	1 991	– 301	0	0	1 690
nicht behandelt <sup>5)</sup> .....	123	– 16	0	0	108
<b>Summe Endenergie</b> .....	<b>7 662</b>	<b>–1 332</b>	<b>–628</b>	<b>–22</b>	<b>5 680</b>
<b>Kraft-Wärme-Kopplung (KWK):</b>					
– Industrie .....	245	359	0	0	604
– Heizkraftwerke .....	254	285	165 <sup>7)</sup>	0	539
– Summe KWK .....	499	643	165 <sup>7)</sup>	0	1 143

1) Raumwärme temperaturbereinigt auf Normaljahr

2) durch erneuerbare Energiequellen substituierte Brennstoffmengen

3) inklusive Brennstoffe für eigenerzeugten und selbstverbrauchten Strom

4) inklusive Treibstoffe für internationalen Flugverkehr (1987: 120 JP)

5) dezentrale Warmwasserversorgung mit Holz und Gas, Kraft und Treibstoffe für Militär und Landwirtschaft, Strom für Wärme im Verkehr, sonstiger Strom von Kleingeräten im Haushalt

6) Minderverbrauch (netto) durch verstärkten Erdgaseinsatz

7) substituierte Brennstoffe im Endenergiesektor und bereitgestellter Strom aus biomassengefeuerter KWK; in Summe nicht berücksichtigt

8) nicht enthalten sind die erneuerbaren Energiequellen

– die Verwendung des vergleichsweise emissionsarmen Erdgases bis auf 3000 PJ (1987: knapp 2000 PJ) erhöht.

Durch die rationellere Energieverwendung wird (unter Berücksichtigung des gegenläufigen Wachstumseffektes) der Endenergieverbrauch von 1987 bis 2005 um rund 1330 PJ (17 Prozent) vermindert; die direkte Nutzung der erneuerbaren Energiequellen führt zu einer Reduzierung des Verbrauchs von konventionellen Energieträgern um knapp 630 PJ (8 Prozent), und der mit dem verstärkten Erdgaseinsatz verbundene Einspareffekt beträgt 22 PJ (vgl. Tabelle 5).

Tabelle 6 zeigt den gesamten Energieverbrauch, unterteilt nach Energieträgern. Einschließlich der mit den substituierten Energieträgern bewerteten erneuerbaren Energiequellen, aber ohne Berücksichtigung

der Energieeinsparung durch energiebewußtes Verhalten, reduziert sich der gesamte Energieverbrauch von knapp 10 800 PJ im Jahre 1987 um fast ein Viertel auf 8200 PJ im Jahre 2005 (vgl. Tab. 6). Besonders stark geht der Verbrauch von Mineralölprodukten (54 Prozent) und von Braunkohlen (46 Prozent) zurück, während derjenige von Steinkohlen um etwa ein Viertel (auf rund 48 Millionen Tonnen SKE) abnimmt. Dagegen steigt der Gasverbrauch um knapp 50 Prozent auf gut 3300 PJ (davon Erdgas rund 3000 PJ beziehungsweise etwa 100 Millionen Tonnen SKE).

Der Versorgungsbeitrag der erneuerbaren Energiequellen erhöht sich zusammengenommen von 320 PJ (1987) um mehr als das Dreifache auf 1060 PJ (2005); ihr Anteil am Energieverbrauch insgesamt nimmt damit von rund 3 Prozent auf knapp 13 Prozent zu.

Tabelle 6a

**Gesamter Energieverbrauch, unterteilt nach Energieträgern<sup>1)</sup>, für die Bundesrepublik Deutschland  
(ohne ehemalige DDR) im Reduktionsszenario „Kernenergieausstieg 2005“  
in Petajoule (PJ)**

Energieträger	1987 Basisjahr		Reduktionsszenario Kernenergieausstieg 2005		
	PJ	Anteil in %	PJ	Veränderung in %	Anteil in %
Steinkohlen .....	1 878	17,4	1 404	– 25,2	17,1
Braunkohlen .....	1 016	9,4	548	– 46,1	6,6
Mineralölprodukte .....	4 060	37,6	1 875	– 54,3	22,5
Gase .....	2 250	20,9	3 331	48,0	40,5
<b>Summe fossile Energieträger .....</b>	<b>9 204</b>	<b>85,3</b>	<b>7 140</b>	<b>– 22,4</b>	<b>86,7</b>
Wasserkraft .....	184	1,7	215	16,8	2,6
Kernenergie .....	1 233	11,4	0	–100,0	0,0
Windenergie .....	0	0	88	–	1,1
Photovoltaik .....	0	0	16	–	0,2
Stromimportsaldo etc. ....	36	0,3	32	0,0	0,4
erneuerbare Energiequellen im Endenergiebereich .....	135	1,3	740	448,1	9,0
<b>Zwischensumme<sup>2)</sup> .....</b>	<b>10 792</b>	<b>100,0</b>	<b>8 231</b>	<b>– 23,7</b>	<b>100,0</b>
Reduktion durch energiebewußtes Verhalten gegenüber 1987 <sup>3)</sup> .....			–540	– 5,0	
<b>Gesamtsumme<sup>2)</sup> .....</b>	<b>10 792</b>	<b>100,0</b>	<b>7 691</b>	<b>– 28,7</b>	

<sup>1)</sup> Abweichungen vom Primärenergieverbrauch durch Nichtberücksichtigung des nichtenergetischen Verbrauchs, des sonstigen Energieaußenhandels etc.

<sup>2)</sup> bewertet mit den substituierten Energieträgern.

<sup>3)</sup> Die Kommission verzichtet auf eine szenariospezifische Differenzierung des Beitrags durch energiebewußtes Verhalten und setzt bei allen Szenarien pauschal 5 Prozent des jeweiligen Wertes des Jahres 1987 an.

Tabelle 6b

**Gesamter Energieverbrauch, unterteilt nach Energieträgern <sup>1)</sup>, für die Bundesrepublik Deutschland  
(ohne ehemalige DDR), im Reduktionsszenario „Kernenergieausstieg 2005“  
in Mio. Tonnen SKE**

Energieträger	1987 Basisjahr		Reduktionsszenario Kernenergieausstieg 2005		
	Mio. t SKE	Anteil in %	Mio. t SKE	Veränderung in %	Anteil in %
Steinkohlen .....	64,1	17,4	47,9	– 25,2	17,1
Braunkohlen .....	34,7	9,4	18,7	– 46,1	6,6
Mineralölprodukte .....	138,4	37,6	63,4	– 54,3	22,5
Gase .....	76,8	20,9	113,7	48,0	40,5
<b>Summe fossile Energieträger .....</b>	<b>314,0</b>	<b>85,3</b>	<b>243,7</b>	<b>– 22,4</b>	<b>86,7</b>
Wasserkraft .....	6,3	1,7	7,3	16,8	2,6
Kernenergie .....	42,1	11,4	0,0	–100,0	0,0
Windenergie .....	0,0	0	3,0	–	1,1
Photovoltaik .....	0,0	0	0,5	–	0,2
Stromimportsaldo etc. ....	1,2	0,3	1,1	0,0	0,4
erneuerbare Energiequellen im Endenergiebereich .....	4,6	1,3	25,2	448,1	9,0
<b>Zwischensumme <sup>2)</sup> .....</b>	<b>368,2</b>	<b>100,0</b>	<b>280,8</b>	<b>– 23,7</b>	<b>100,0</b>
Reduktion durch energiebewußtes Verhalten gegenüber 1987 <sup>3)</sup> .....			–18,4	–540	–5,0
<b>Gesamtsumme <sup>2)</sup> .....</b>	<b>368,2</b>	<b>100,0</b>	<b>262,4</b>	<b>– 28,7</b>	

<sup>1)</sup> Abweichungen vom Primärenergieverbrauch durch Nichtberücksichtigung des nichtenergetischen Verbrauchs, des sonstigen Energieaußenhandels etc.

<sup>2)</sup> bewertet mit den substituierten Energieträgern.

<sup>3)</sup> Die Kommission verzichtet auf eine szenariospezifische Differenzierung des Beitrags durch energiebewußtes Verhalten und setzt bei allen Szenarien pauschal 5 Prozent des jeweiligen Wertes des Jahres 1987 an.

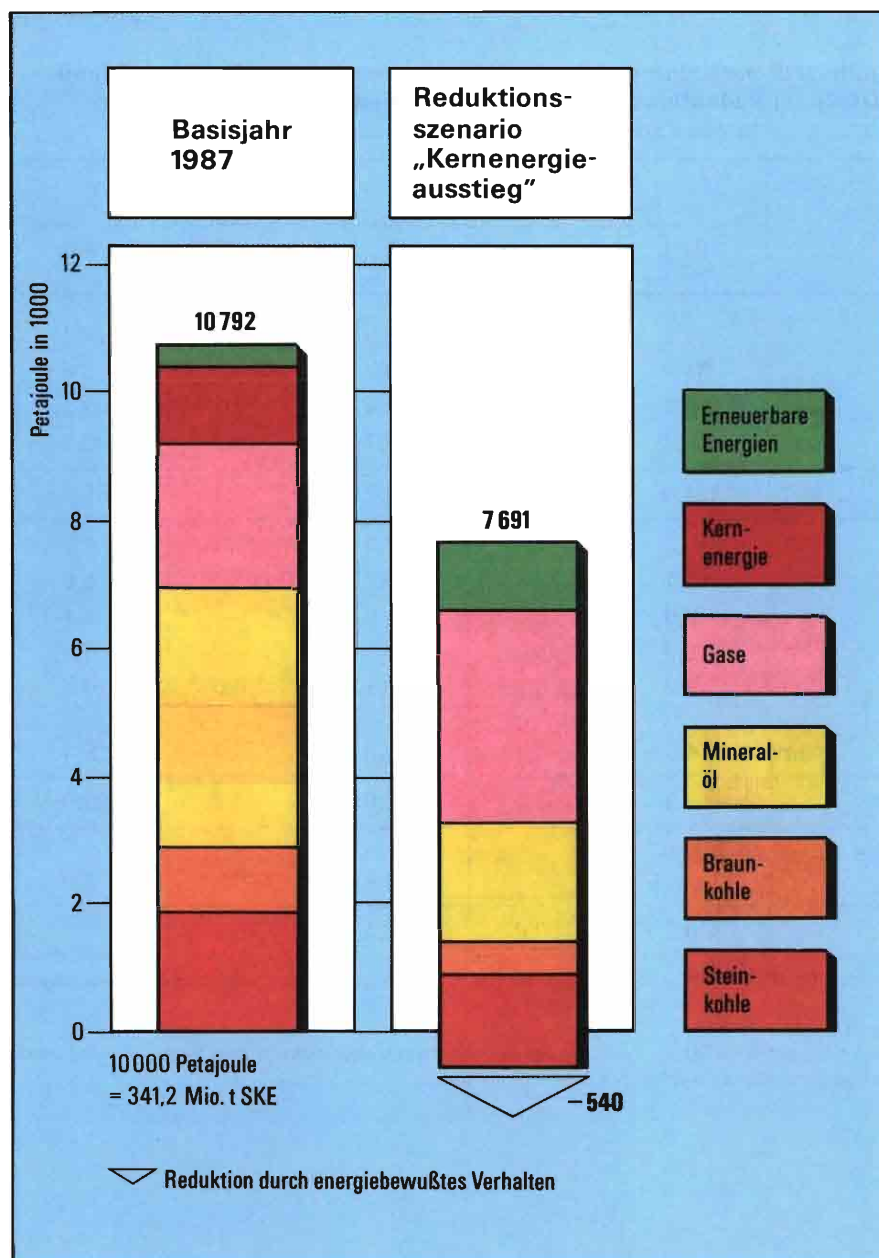


Abb. 4: Entwicklung des Energieverbrauchs, unterteilt nach Energieträgern, für die Bundesrepublik Deutschland (ohne ehemalige DDR) bis zum Jahr 2005 im Reduktionsszenario „Kernenergieausstieg 2005“

Unter Einschluß der Reduktion durch energiebewußtes Verhalten können die CO<sub>2</sub>-Emissionen in dem hier skizzierten Reduktionsszenario bis zum Jahr 2005 um rund 241 Millionen Tonnen, also gegenüber 1987 um 33,7 Prozent, gesenkt werden (vgl. Tabelle 7).

Hierbei vermindern sich die Emissionen im Endenergiebereich um 179 Millionen Tonnen CO<sub>2</sub> (39,5 Prozent), wobei insbesondere im Haushaltsbereich und – mit etwas Abstand – im Kleinverbrauch die höchsten Reduktionspotentiale mobilisiert werden können. Demgegenüber sinken die Emissionen in den Sektoren Industrie und Verkehr deutlich geringer, was unter anderem Ausdruck des angenommenen

Wirtschaftswachstums sowie des erheblichen Anstiegs der Verkehrsleistungen ist.

Im gesamten Umwandlungssektor gehen die CO<sub>2</sub>-Emissionen um 26 Millionen Tonnen (9,9 Prozent) zurück. Der Ausbau der Kraft-Wärme-Kopplung führt zwar zu einer Erhöhung der CO<sub>2</sub>-Emissionen in diesem Sektor um 37 Millionen Tonnen (plus 82,2 Prozent). Durch diesen Ausbau werden jedoch im Endenergiebereich 29 Millionen Tonnen CO<sub>2</sub> und in der sonstigen Stromerzeugung 47 Millionen Tonnen CO<sub>2</sub> vermieden. In der sonstigen Stromerzeugung ergibt sich dadurch, verbunden mit den übrigen Maßnah-

**Verbrauch von fossilen Energieträgern und Kernbrennstoffen in Petajoule (PJ)  
sowie CO<sub>2</sub>-Emissionen in Millionen Tonnen für die Bundesrepublik Deutschland (ohne ehemalige DDR)  
im Reduktionsszenario „Kernenergieausstieg 2005“**

	Basisjahr 1987		Reduktionsszenario Kernenergieausstieg 2005			
	Brennstoffe  PJ	CO <sub>2</sub> -Emis- sionen  Mio. t	Brennstoffe  PJ	CO <sub>2</sub> -Emissionen		
				Mio. t	Reduktion in	
					Mio. t	%
<b>Endenergiesektoren:</b>						
Haushalte .....	1 615	113	695	41	- 72	-63,7
Kleinverbrauch .....	870	60	411	24	- 36	-60,0
Industrie 1) .....	1 782	131	1 664	113	- 18	-13,7
Verkehr .....	1 961	143	1 642	120	- 23	-16,1
nicht behandelte Sektoren .....	83	6	61	5	- 1	
Substitution durch Kraft-Wärme- Kopplung .....	0		-439	-29	- 29	
<b>Summe Endenergiesektoren .....</b>	<b>6 311</b>	<b>453</b>	<b>4 034</b>	<b>274</b>	<b>-179</b>	<b>-39,5</b>
<b>Umwandlungssektoren:</b>						
Kraft-Wärme-Kopplung und Heiz- werke .....	499	45	1 143	82	37	82,2
Sonstige Stromerzeugung .....	3 185	189	1 730	140	- 49	-25,9
Sonstige Umwandlungssektoren und statistische Differenzen .....	442	28	235	14	- 14	
<b>Summe Umwandlungssektoren ...</b>	<b>4 126</b>	<b>262</b>	<b>3 108</b>	<b>236</b>	<b>- 26</b>	<b>- 9,9</b>
<b>Zwischensumme Endenergiesektoren und Umwandlungsbereich ....</b>	<b>10 437</b>	<b>715</b>	<b>7 142</b>	<b>510</b>	<b>-205</b>	<b>-28,7</b>
<b>Reduktion durch energiebewußtes Verhalten gegenüber 1987 2) .....</b>			<b>-522</b>		<b>- 36</b>	<b>- 5</b>
<b>Gesamtsumme .....</b>	<b>10 437</b>	<b>715</b>	<b>6 620</b>	<b>474</b>	<b>-241</b>	<b>-33,7</b>

1) Inklusive Brennstoffeinsatz und -emissionen für eigenerzeugten und selbstverbrauchten Strom

2) Die Kommission verzichtet auf eine szenariospezifische Differenzierung des Beitrags durch energiebewußtes Verhalten und setzt bei allen Szenarien pauschal 5 Prozent des jeweiligen Wertes des Jahres 1987 an.

men in diesem Sektor, eine Reduktion um 49 Millionen Tonnen CO<sub>2</sub> (25,9 Prozent) gegenüber 1987.

Hinzu kommen die Auswirkungen eines energiebewußteren Verhaltens sowie eines freiwilligen Verzichts auf die Inanspruchnahme von Energiedienstleistungen. Die Kommission verzichtet auf eine szenariospezifische Differenzierung des Beitrages durch energiebewußtes Verhalten und setzt bei allen Reduktionsszenarien eine zusätzliche Reduktion der CO<sub>2</sub>-Emissionen um pauschal 5 Prozent gegenüber 1987 an, so daß sich eine Gesamtreduktion um 33,7 Prozent bis zum Jahr 2005 ergibt.

Das Ausstiegsszenario setzt eine grundlegend gewandelte Energiepolitik einschließlich der Verkehrspolitik mit Schwerpunkten auf der rationellen Energieverwendung, der Nutzung erneuerbarer Energiequellen, dem Ausbau der Kraft-Wärme-Kopplung sowie der Substitution durch Erdgas voraus. Insgesamt muß zu seiner Realisierung in den Sektoren, für die die entsprechenden Informationen vorliegen, in den Jahren bis 2005 ein Investitionsvolumen von rund 500 Milliarden DM mobilisiert werden. Das Schwergewicht der Investitionen liegt bei Maßnahmen zur Verminderung des Raumwärmebedarfs, gefolgt von den Systemen

Tabelle 7 b

**Verbrauch von fossilen Energieträgern und Kernbrennstoffen in Millionen Tonnen SKE  
sowie CO<sub>2</sub>-Emissionen in Millionen Tonnen für die Bundesrepublik Deutschland (ohne ehemalige DDR)  
im Reduktionsszenario „Kernenergieausstieg 2005“**

	Basisjahr 1987		Reduktionsszenario Kernenergieausstieg 2005			
	Brennstoffe  PJ	CO <sub>2</sub> -Emissionen  Mio. t	Brennstoffe  PJ	CO <sub>2</sub> -Emissionen		
				Mio. t	Reduktion in	
					Mio. t	%
<b>Endenergiesektoren:</b>						
Haushalte .....	55,1	113	23,7	41	– 72	–63,7
Kleinverbrauch .....	29,7	60	14,0	24	– 36	–60,0
Industrie 1) .....	60,8	131	56,8	113	– 18	–13,7
Verkehr .....	66,9	143	56,0	120	– 23	–16,1
nicht behandelte Sektoren .....	2,8	6	2,1	5	– 1	
Substitution durch Kraft-Wärme-Kopplung .....	0,0		–15,0	–29	– 29	
<b>Summe Endenergiesektoren .....</b>	<b>215,3</b>	<b>453</b>	<b>137,6</b>	<b>274</b>	<b>–179</b>	<b>–39,5</b>
<b>Umwandlungssektoren:</b>						
Kraft-Wärme-Kopplung und Heizwerke .....	17,0	45	39,0	82	37	82,2
Sonstige Stromerzeugung .....	108,7	189	59,0	140	– 49	–25,9
Sonstige Umwandlungssektoren und statistische Differenzen .....	15,1	28	8,0	14	– 14	
<b>Summe Umwandlungssektoren ...</b>	<b>140,8</b>	<b>262</b>	<b>106,0</b>	<b>236</b>	<b>– 26</b>	<b>– 9,9</b>
<b>Zwischensumme Endenergiesektoren und Umwandlungsbereich ....</b>	<b>356,1</b>	<b>715</b>	<b>243,6</b>	<b>510</b>	<b>–205</b>	<b>–28,7</b>
<b>Reduktion durch energiebewußtes Verhalten gegenüber 1987 2) .....</b>			<b>–17,8</b>		<b>– 36</b>	<b>– 5</b>
<b>Gesamtsumme .....</b>	<b>356,1</b>	<b>715</b>	<b>225,8</b>	<b>474</b>	<b>–241</b>	<b>–33,7</b>

1) Inklusive Brennstoffeinsatz und -emissionen für eigenerzeugten und selbstverbrauchten Strom

2) Die Kommission verzichtet auf eine szenariospezifische Differenzierung des Beitrags durch energiebewußtes Verhalten und setzt bei allen Szenarien pauschal 5 Prozent des jeweiligen Wertes des Jahres 1987 an.

zur Nutzung erneuerbarer Energiequellen und von Kraft-Wärme-Kopplungs-Anlagen.

Bei den angenommenen Energiepreiserhöhungen ohne Preispolitik (vgl. Tabelle 1) werden die Zusatzkosten nur zum Teil durch die Energiekosteneinsparung ausgeglichen. Abgesehen von den angenommenen Maßnahmen zur rationellen Energieverwendung bei Haushalts-Elektrogeräten und bei den Raffinerien führen die Investitionen unter diesen Voraussetzungen im Mittel zu zusätzlichen jährlichen Nettokosten, die sich insgesamt auf annähernd 9,4 Milliarden DM summieren. Pro Einwohner und Jahr sind dies 156

DM. Vor diesem Hintergrund und bei den im Ausstiegsszenario unterstellten Annahmen ist eine Umsetzung der im Ausstiegsszenario unterstellten Maßnahmen aus einzelwirtschaftlicher Sicht ohne entsprechende Anreize durch höhere Energiepreise und/oder durch eine deutliche finanzielle Förderung nicht zu erwarten.

Eine erste Abschätzung im Reduktionsszenario „Kernenergieausstieg 2005“ zeigt, daß ein Ausstieg aus der Kernenergie bis spätestens zum Jahr 1995 mit einer vorübergehenden Erhöhung der CO<sub>2</sub>-Emissionen (im Jahr 1995 gegenüber dem Jahr 1987 um gut



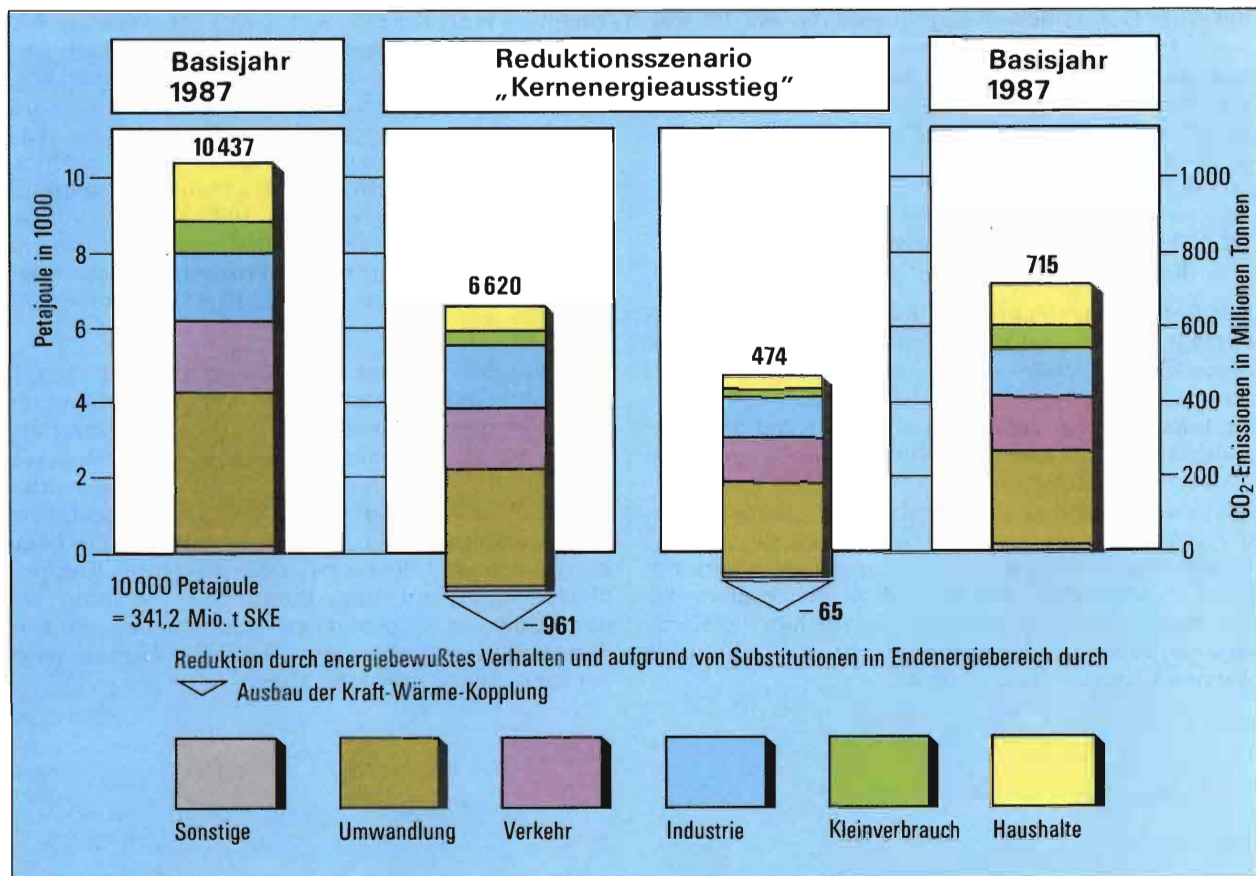


Abb. 5: Entwicklung des Verbrauchs von fossilen Energieträgern und Kernbrennstoffen sowie CO<sub>2</sub>-Emissionen für die Bundesrepublik Deutschland (ohne ehemalige DDR) bis zum Jahr 2005 im Reduktionsszenario „Kernenergieausstieg 2005“

3 Millionen Tonnen beziehungsweise knapp ein Prozent) verbunden ist. Der Ausstieg bis zum Jahr 1995 ist im Reduktionsszenario „Kernenergieausstieg 2005“ nur dann ohne Einschränkungen der Versorgungssicherheit durchführbar, wenn der Stromverbrauch bis 1995 spürbar gesenkt oder der dann bestehende Kapazitätsbedarf durch den Bau neuer Kraftwerke, vor allem auf Erdgasbasis, gedeckt werden kann. Bis zum Jahr 2005 führt im Reduktionsszenario „Kernenergieausstieg 2005“ dann der Ausstieg bis 1995 zu den gleichen Ergebnissen wie das Ausstiegsszenario 2005, das heißt im Jahr 2005 ergibt sich eine Gesamtreduktion der CO<sub>2</sub>-Emissionen, einschließlich der Reduktion durch energiebewußtes Verhalten, um 33,7 Prozent.

Um den Ausstieg aus der Kernenergie bis spätestens 1995 ausführlicher zu berücksichtigen, hat die Kommission zusätzlich das Reduktionsszenario „Kernenergieausstieg 1995“ durchrechnen lassen. An der Ausarbeitung dieses kurzfristig erstellten Szenarios waren die Koordinatoren des Studienprogramms nicht beteiligt. Es enthält keine detaillierten Angaben über die zugrundegelegten Annahmen und kann daher nicht auf die Konsistenz mit dem gemeinsamen Analyseraster des Studienprogramms überprüft werden.

Das Reduktionsszenario „Kernenergieausstieg 1995“ unterscheidet sich vom Reduktionsszenario „Kernenergieausstieg 2005“ hauptsächlich durch noch intensivere Maßnahmen im Verkehrsbereich und durch einen weitergehenden Ausbau der Kraft-Wärme-Kopplung in Höhe des in der betreffenden Einzelstudie des Studienprogramms angegebenen Potentials. Es ist mit einer Reduktion der CO<sub>2</sub>-Emissionen im Jahr 1995 gegenüber dem Jahr 1987 um etwa 8 Prozent auf 660 Millionen Tonnen verbunden. Bis zum Jahr 2005 führt dann dieses Reduktionsszenario zu einer Reduktion der CO<sub>2</sub>-Emissionen um 35 Prozent auf 463 Millionen Tonnen, worin die Beiträge durch energiebewußtes Verhalten enthalten sind.

Insgesamt dürfte bei der Verfolgung der beiden hier im Mittelpunkt stehenden Ziele auch bei einem mittelfristigen Ausstieg aus der Kernenergie bis zum Jahr 2005 bei den getroffenen Annahmen vermutlich mit zusätzlichen Anstrengungen und Belastungen zu rechnen sein. Andererseits ist aber nicht auszuschließen, daß bereits der Entschluß, auf die weitere Nutzung der Kernenergie zu verzichten und damit eine angebotslimitierende Politik zu betreiben, Innovationspotentiale in der Wirtschaft und in der Bevölkerung erschließt.

Bei einer Gesamtbewertung müssen die aus der weiteren Nutzung der Kernenergie folgenden Risiken und Entsorgungsprobleme berücksichtigt werden. Eine solche Abwägung und Bewertung muß zukünftig vorgenommen werden; sie ist nicht Aufgabe der Enquete-Kommission „Vorsorge zum Schutz der Erdatmosphäre“.

#### 1.2.4 Reduktionsszenario „Ausbau der Kernenergie“

Das Reduktionsszenario mit Kernenergieausbau unterstellt, daß die wesentlichen Hemmnisse, die der rationellen Energieverwendung sowie der Nutzung erneuerbarer Energiequellen entgegenstehen, abgebaut und die angestrebten Treibhausgasminderungsziele mit einem Ausbau der Nutzung der Kernenergie sowie mit möglichst geringen zusätzlichen Kosten erreicht werden sollen. Eine Analyse von Standort-, Genehmigungs- und Akzeptanzfragen wurde von der Kommission für die Kernenergieausbau-Variante nicht vorgenommen. Die Ergebnisse gelten unter der Annahme, daß die einem weiteren Ausbau der Kernenergie entgegenstehenden Hemmnisse abgebaut werden können.

Tabelle 8 führt die mit dem Reduktionsszenario verbundenen Maßnahmen im Endenergiebereich und bei der Kraft-Wärme-Kopplung auf. Die Ausschöpfung der wirtschaftlich sinnvollen Möglichkeiten der rationellen Energieverwendung führt trotz eines Wirtschaftswachstums um gut 50 Prozent zu einem Rückgang des Energieverbrauchs der Endenergiesektoren um rund 5 Prozent gegenüber 1987 auf 7166 PJ. Die Nutzung der Kraft-Wärme-Kopplung in Industrie und Kleinverbrauch steigt um 70 Prozent, und die Fernwärmeerzeugung in Heizkraftwerken verdoppelt sich.

Die Energieerzeugung mit Hilfe erneuerbarer Energiequellen in Form von Wärme und Strom nimmt um fast 90 Prozent zu. Durch den Ausbau der Kernkraftwerke auf eine installierte Leistung von 36,6 GWel werden mit 254 TWh rund 60 Prozent der gesamten elektrischen Arbeit erzeugt (1987: 31,2 Prozent). Des Weiteren werden auch Fernwärme aus Kernkraftwerken sowie 30 Hochtemperaturreaktoren (Doppelblockanlagen) mit einer thermischen Leistung von insgesamt 12 Gigawatt zur industriellen Prozeßdampferzeugung eingesetzt. Der Erdgaseinsatz steigt auf rund 2500 PJ im Jahr 2005.

Tabelle 8

#### Zusammenstellung der emissionsmindernden Maßnahmen in den Endenergiesektoren und im Kraft-Wärme-Kopplungs-Bereich für das Reduktionsszenario „Ausbau der Kernenergie“ in Petajoule (PJ)

	Energieverbrauch 1987	Änderungen im Jahr 2005 gegenüber 1987 durch			Energieverbrauch 2005 <sup>8)</sup>
		rationelle Energieverwendung	erneuerbare Energiequellen <sup>2)</sup>	Substitution fossiler Energien <sup>6)</sup>	
Private Haushalte <sup>1)</sup> .....	2 034	- 549	- 57	- 11	1 417
Kleinverbraucher .....	1 225	- 85	- 51	- 9	1 080
Industrie <sup>3)</sup> .....	2 289	+ 241	- 11	- 4	2 514
Verkehr <sup>4)</sup> .....	1 991	+ 29	0	0	2 020
nicht behandelt <sup>5)</sup> .....	123	+ 10	0	0	133
<b>Summe Endenergie .....</b>	<b>7 662</b>	<b>- 353</b>	<b>- 119</b>	<b>- 24</b>	<b>7 166</b>
<b>Kraft-Wärme-Kopplung (KWK):</b>					
– Industrie .....	245	+ 99	0	- 319 <sup>7)</sup>	26
– Heizkraftwerke .....	254	+ 132	- 94	- 125 <sup>7)</sup>	166
– Summe KWK .....	499	+ 231	- 94	- 444 <sup>7)</sup>	192

<sup>1)</sup> Raumwärme temperaturbereinigt auf Normaljahr

<sup>2)</sup> durch erneuerbare Energiequellen substituierte Brennstoffmengen

<sup>3)</sup> inklusive Brennstoffe für eigenerzeugten und selbstverbrauchten Strom

<sup>4)</sup> inklusive Treibstoffe für internationalen Flugverkehr (1987: 120 JP)

<sup>5)</sup> dezentrale Warmwasserversorgung mit Holz und Gas, Kraft und Treibstoffe für Militär und Landwirtschaft, Strom für Wärme im Verkehr, sonstiger Strom von Kleingeräten im Haushalt

<sup>6)</sup> Minderverbrauch (netto) durch verstärkten Erdgaseinsatz

<sup>7)</sup> substituierte Brennstoffe im Endenergiesektor und bereitgestellter Strom aus Kernenergie (insgesamt 433 TJ) und biomassengefeuerter KWK (1 PJ)

<sup>8)</sup> nicht enthalten sind die erneuerbaren Energiequellen

**Gesamter Energieverbrauch, unterteilt nach Energieträgern<sup>1)</sup>, für die Bundesrepublik Deutschland  
(ohne ehemalige DDR) im Reduktionsszenario „Kernenergieausbau“  
in Petajoule (PJ)**

Energieträger	1987 Basisjahr		Reduktionsszenario Kernenergieausbau im Jahr 2005		
	PJ	Anteil in %	PJ	Veränderung in %	Anteil in %
Steinkohlen .....	1 878	17,4	1 092	-41,5	11,0
Braunkohlen .....	1 016	9,4	453	-54,7	4,6
Mineralölprodukte .....	4 060	37,6	2 725	-33,8	27,5
Gase .....	2 250	20,9	2 620	13,6	24,6
<b>Summe fossile Energieträger .....</b>	<b>9 204</b>	<b>85,3</b>	<b>6 890</b>	<b>-25,8</b>	<b>69,5</b>
Wasserkraft .....	184	1,7	214	16,3	2,2
Kernenergie .....	1 233	11,4	2 439	97,8	24,6
Windenergie .....	0	0	12,3	—	0,1
Photovoltaik .....	0	0	0,3	—	0,0
Stromimportsaldo etc. ....	36	0,3	34,2	- 5,0	0,4
erneuerbare Energiequellen im Endenergiebereich .....	135	1,3	320	199,1	3,2
<b>Zwischensumme<sup>2)</sup> .....</b>	<b>10 792</b>	<b>100,0</b>	<b>9 910</b>	<b>- 8,2</b>	<b>100,0</b>
Reduktion durch energiebewußtes Verhalten gegenüber 1987 <sup>3)</sup> .....			-540	- 5,0	
<b>Gesamtsumme<sup>2)</sup> .....</b>	<b>10 792</b>	<b>100,0</b>	<b>9 370</b>	<b>-13,2</b>	

1) Abweichungen vom Primärenergieverbrauch durch Nichtberücksichtigung des nichtenergetischen Verbrauchs, des sonstigen Energieaußenhandels etc.

2) bewertet mit den substituierten Energieträgern

3) Die Kommission verzichtet auf eine szenariospezifische Differenzierung des Beitrags durch energiebewußtes Verhalten und setzt bei allen Szenarien pauschal 5 Prozent des jeweiligen Wertes des Jahres 1987 an.

Tabelle 9 zeigt den gesamten Energieverbrauch, unterteilt nach Energieträgern. Einschließlich der mit den substituierten Energieträgern bewerteten erneuerbaren Energiequellen, aber ohne Berücksichtigung der Energieeinsparung durch energiebewußtes Verhalten, reduziert sich der gesamte Energieverbrauch von knapp 10 800 PJ im Jahre 1987 auf 9900 PJ im Jahre 2005 (vgl. Tabelle 9). Der Verbrauch von Mineralölprodukten (minus 34 Prozent), von Braunkohlen (minus 55 Prozent) und von Steinkohlen (minus 42 Prozent) geht stark zurück. Dagegen steigt der Gasverbrauch um knapp 14 Prozent auf gut 2600 PJ.

Tabelle 9b

**Gesamter Energieverbrauch, unterteilt nach Energieträgern<sup>1)</sup>, für die Bundesrepublik Deutschland  
(ohne ehemalige DDR) im Reduktionsszenario „Kernenergieausbau“  
in Millionen Tonnen SKE**

Energieträger	1987 Basisjahr		Reduktionsszenario Kernenergieausbau im Jahr 2005		
	Mio. t SKE	Anteil in %	Mio. t SKE	Veränderung in %	Anteil in %
Steinkohlen .....	64,1	17,4	37,3	- 41,5	11,0
Braunkohlen .....	34,7	9,4	15,5	- 54,7	4,6
Mineralölprodukte .....	138,4	37,6	93,0	- 33,8	27,5
Gase .....	76,8	20,9	89,3	13,6	26,4
<b>Summe fossile Energieträger .....</b>	<b>314,0</b>	<b>85,3</b>	<b>235,1</b>	<b>- 25,8</b>	<b>69,5</b>
Wasserkraft .....	6,3	1,7	7,3	16,3	2,2
Kernenergie .....	42,1	11,4	83,2	97,8	24,6
Windenergie .....	0,0	0	0,4	-	0,1
Photovoltaik .....	0,0	0	0,0	-	0,0
Stromimportsaldo etc. ....	1,2	0,3	1,2	- 5,0	0,4
erneuerbare Energiequellen im Endenergiebereich .....	4,6	1,3	10,9	199,1	3,2
<b>Zwischensumme<sup>2)</sup> .....</b>	<b>368,2</b>	<b>100,0</b>	<b>338,1</b>	<b>- 8,2</b>	<b>100,0</b>
Reduktion durch energiebewußtes Verhalten gegenüber 1987 <sup>3)</sup> .....			-18,4	-540	-5,0
<b>Gesamtsumme<sup>2)</sup> .....</b>	<b>368,2</b>	<b>100,0</b>	<b>319,7</b>	<b>- 13,2</b>	

<sup>1)</sup> Abweichungen vom Primärenergieverbrauch durch Nichtberücksichtigung des nichtenergetischen Verbrauchs, des sonstigen Energieaußenhandels etc.

<sup>2)</sup> bewertet mit den substituierten Energieträgern.

<sup>3)</sup> Die Kommission verzichtet auf eine szenariospezifische Differenzierung des Beitrags durch energiebewußtes Verhalten und setzt bei allen Szenarien pauschal 5 Prozent des jeweiligen Wertes des Jahres 1987 an.

Unter Einschluß der Reduktion durch energiebewußtes Verhalten können die CO<sub>2</sub>-Emissionen in dem hier skizzierten Reduktionsszenario bis zum Jahr 2005 um 256 Millionen Tonnen, also gegenüber 1987 um 35,8 Prozent, gesenkt werden (vgl. Tabelle 10).

Hierbei vermindern sich die Emissionen im Endenergiebereich um 70 Millionen Tonnen (15,5 Prozent), wobei insbesondere im Haushaltsbereich und – mit etwas Abstand – im Kleinverbrauch die höchsten Reduktionspotentiale mobilisiert werden können. Demgegenüber steigen die Emissionen in den Sektoren Industrie und Verkehr trotz der ergriffenen Maßnahmen leicht an, was unter anderem Ausdruck des angenommenen Wirtschaftswachstums sowie des erheblichen Anstiegs der Verkehrsleistungen ist.

Im gesamten Umwandlungssektor gehen die CO<sub>2</sub>-Emissionen um 150 Millionen Tonnen (57,3 Prozent) zurück. Die Entwicklung in der Kraft-Wärme-Kopp-

lung führt zu einer Reduktion der CO<sub>2</sub>-Emissionen um 29 Millionen Tonnen (69,4 Prozent) in diesem Sektor, zusätzlich werden 12 Millionen Tonnen CO<sub>2</sub> im Endenergiebereich und 12 Millionen Tonnen CO<sub>2</sub> in der sonstigen Stromerzeugung vermieden. In der sonstigen Stromerzeugung ergibt sich dadurch, verbunden mit den übrigen Maßnahmen in diesem Sektor, eine Reduktion um 107 Millionen Tonnen CO<sub>2</sub> (56,6 Prozent) gegenüber 1987.

Hinzu kommen die Auswirkungen eines energiebewußteren Verhaltens sowie eines freiwilligen Verzichts auf die Inanspruchnahme von Energiedienstleistungen. Die Kommission verzichtet hierbei auf eine szenariospezifische Differenzierung des Beitrages durch energiebewußtes Verhalten und setzt bei allen Reduktionsszenarien eine zusätzliche Reduktion der CO<sub>2</sub>-Emissionen um pauschal 5 Prozent an, so daß sich eine Gesamtreduktion um 35,8 Prozent ergibt.

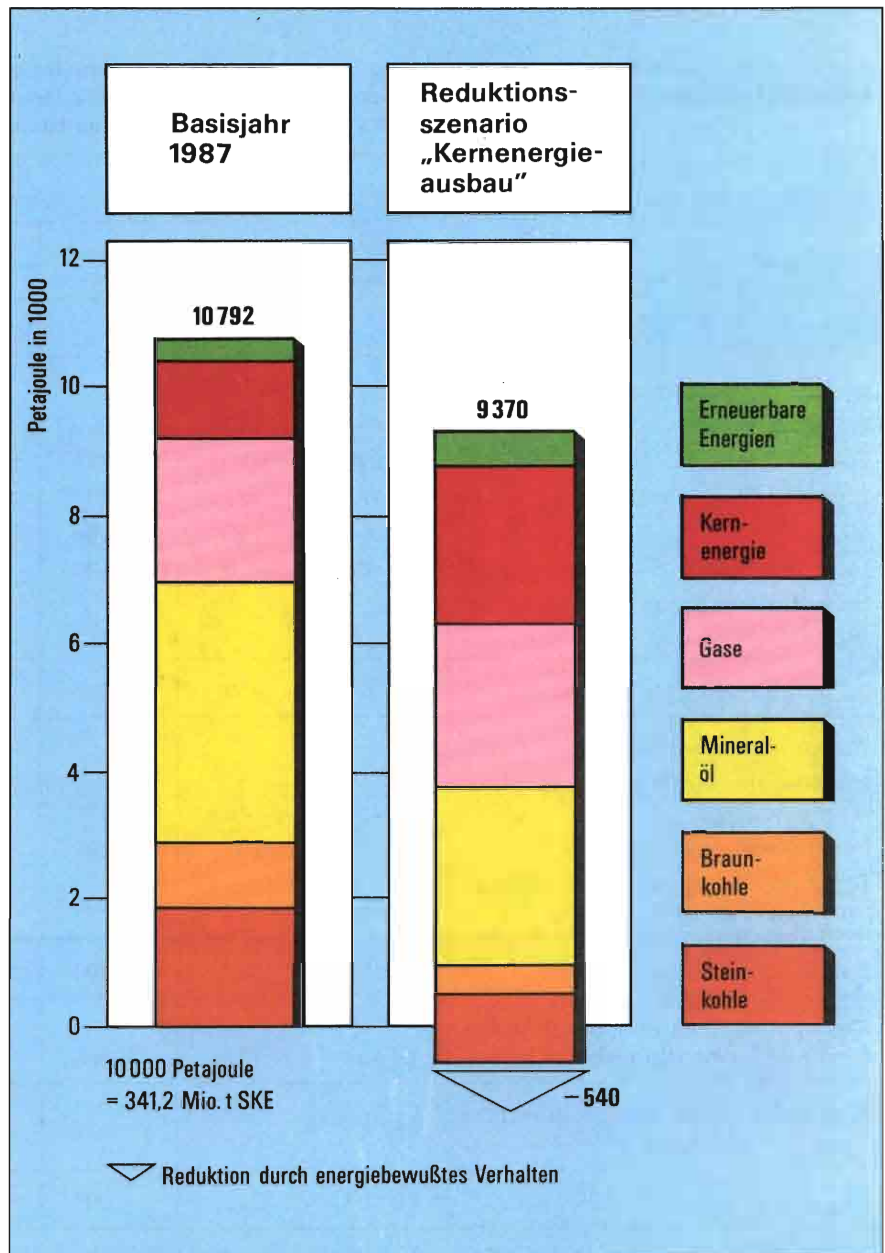


Abb. 6: Entwicklung des Energieverbrauchs, unterteilt nach Energieträgern, für die Bundesrepublik Deutschland (ohne ehemalige DDR) bis zum Jahr 2005 im Reduktionsszenario „Kernenergieausbau“

Im Rahmen des Reduktionsszenarios „Ausbau der Kernenergie“ ergäbe sich nach den darin enthaltenen Berechnungen bei weitergehenden Maßnahmen zur Emissionsreduktion (zum Beispiel einer intensiveren Anwendung der rationellen Energienutzung) eine höhere CO<sub>2</sub>-Reduktion als die hier ausgewiesene. Dies wird allerdings von einem Teil der Kommissionsmitglieder in Frage gestellt.

Mit der Minderung der CO<sub>2</sub>-Emissionen ist auch eine Reduktion der übrigen klimarelevanten Spurengase verbunden. Dabei werden gegenüber 1987 die Me-

than-Emissionen des Energiesektors um 41 Prozent, die Emissionen flüchtiger organischer Verbindungen (ohne Methan) um 87 Prozent und die Stickoxid-Emissionen um 53 Prozent reduziert.

Diese Minderung der CO<sub>2</sub>-Emissionen im Reduktionsszenario mit Ausbau der Kernenergie ist, bei den angenommenen Energiepreissteigerungen ohne Preispolitik (vgl. Tabelle 1), mit einer Ersparnis von rund 4,6 Milliarden DM pro Jahr verbunden. Dies entspricht einer Ersparnis von 77 DM pro Einwohner und Jahr.

**Verbrauch von fossilen Energieträgern und Kernbrennstoffen in Petajoule (PJ)  
sowie CO<sub>2</sub>-Emissionen in Millionen Tonnen für die Bundesrepublik Deutschland (ohne ehemalige DDR)  
im Reduktionsszenario „Kernenergieausbau“**

	Basisjahr 1987		Reduktionsszenario Kernenergieausbau im Jahr 2005			
	Brennstoffe  PJ	CO <sub>2</sub> -Emissionen  Mio. t	Brennstoffe  PJ	CO <sub>2</sub> -Emissionen		
				Mio. t	Reduktion in	
			Mio. t		Mio. t	%
<b>Endenergiesektoren:</b>						
Haushalte .....	1 615	113	1 029	62	- 51	-45,1
Kleinverbrauch .....	870	60	727	40	- 20	-33,3
Industrie <sup>1)</sup> .....	1 782	131	1 891	144	13	- 9,9
Verkehr .....	1 961	143	1 968	144	1	- 0,7
nicht behandelte Sektoren .....	83	6	82	5	- 1	
Substitution durch Kraft-Wärme-Kopplung .....	0		-171	-12	- 12	
<b>Summe Endenergiesektoren .....</b>	<b>6 311</b>	<b>453</b>	<b>5 526</b>	<b>383</b>	<b>- 70</b>	<b>-15,5</b>
<b>Umwandlungssektoren:</b>						
Kraft-Wärme-Kopplung und Heizwerke .....	499	45	378	16	- 29	-64,4
Sonstige Stromerzeugung .....	3 185	189	3 190	82	-107	-56,6
Sonstige Umwandlungssektoren und statistische Differenzen .....	442	28	235	14	- 14	
<b>Summe Umwandlungssektoren ...</b>	<b>4 126</b>	<b>262</b>	<b>3 803</b>	<b>112</b>	<b>-150</b>	<b>-57,3</b>
<b>Zwischensumme Endenergiesektoren und Umwandlungsbereich ...</b>	<b>10 437</b>	<b>715</b>	<b>9 329</b>	<b>495</b>	<b>-220</b>	<b>-30,8</b>
Reduktion durch energiebewußtes Verhalten gegenüber 1987 <sup>2)</sup> .....			-522		- 36	- 5
<b>Gesamtsumme .....</b>	<b>10 437</b>	<b>715</b>	<b>8 807</b>	<b>459</b>	<b>-256</b>	<b>-35,8</b>

<sup>1)</sup> Inklusive Brennstoffeinsatz und -emissionen für eigenerzeugten und selbstverbrauchten Strom

<sup>2)</sup> Die Kommission verzichtet auf eine szenariospezifische Differenzierung des Beitrags durch energiebewußtes Verhalten und setzt bei allen Szenarien pauschal 5 Prozent des jeweiligen Wertes des Jahres 1987 an.

Tabelle 10 b

**Verbrauch von fossilen Energieträgern und Kernbrennstoffen in Millionen Tonnen SKE  
sowie CO<sub>2</sub>-Emissionen in Millionen Tonnen für die Bundesrepublik Deutschland (ohne ehemalige DDR)  
im Reduktionsszenario „Kernenergieausbau“**

	Basisjahr 1987		Reduktionsszenario Kernenergieausbau im Jahr 2005			
	Brennstoffe	CO <sub>2</sub> -Emissionen	Brennstoffe	CO <sub>2</sub> -Emissionen		
				Mio. t SKE	Mio. t	Reduktion in
Mio. t SKE	Mio. t	Mio. t	Mio. t			%
<b>Endenergiesektoren:</b>						
Haushalte .....	55,1	113	35,1	62	- 51	-45,1
Kleinverbrauch .....	29,7	60	24,8	40	- 20	-33,3
Industrie <sup>1)</sup> .....	60,8	131	64,5	114	13	9,9
Verkehr .....	66,9	143	67,1	144	1	0,7
nicht behandelte Sektoren .....	2,8	6	2,8	5	- 1	
Substitution durch Kraft-Wärme-Kopplung .....	0,0		-5,8	-12	- 12	
<b>Summe Endenergiesektoren .....</b>	<b>215,3</b>	<b>453</b>	<b>188,5</b>	<b>383</b>	<b>- 70</b>	<b>-15,5</b>
<b>Umwandlungssektoren:</b>						
Kraft-Wärme-Kopplung und Heizwerke .....	17,0	45	12,9	16	- 29	-64,4
Sonstige Stromerzeugung .....	108,7	189	108,9	82	-107	-56,6
Sonstige Umwandlungssektoren und statistische Differenzen .....	15,1	28	8,0	14	- 14	
<b>Summe Umwandlungssektoren ...</b>	<b>140,8</b>	<b>262</b>	<b>129,8</b>	<b>112</b>	<b>-150</b>	<b>-57,3</b>
<b>Zwischensumme Endenergiesektoren und Umwandlungsbereich ....</b>	<b>356,1</b>	<b>715</b>	<b>318,3</b>	<b>495</b>	<b>-220</b>	<b>-30,8</b>
Reduktion durch energiebewußtes Verhalten gegenüber 1987 <sup>2)</sup> .....			-17,8		- 36	- 5
<b>Gesamtsumme .....</b>	<b>356,1</b>	<b>715</b>	<b>300,5</b>	<b>459</b>	<b>-256</b>	<b>-35,8</b>

<sup>1)</sup> Inklusive Brennstoffeinsatz und -emissionen für eigenerzeugten und selbstverbrauchten Strom

<sup>2)</sup> Die Kommission verzichtet auf eine szenariospezifische Differenzierung des Beitrags durch energiebewußtes Verhalten und setzt bei allen Szenarien pauschal 5 Prozent des jeweiligen Wertes des Jahres 1987 an.

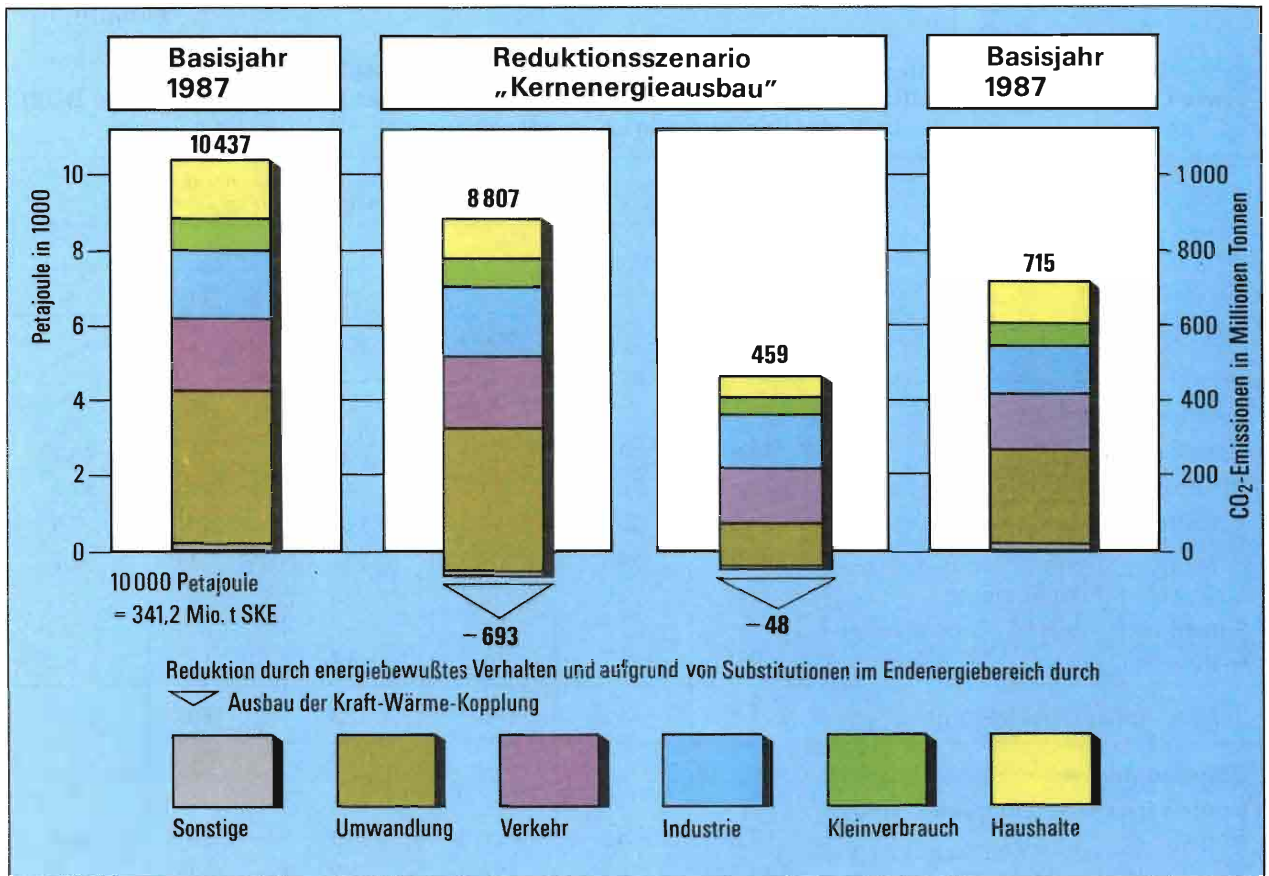


Abb. 7: Entwicklung des Verbrauchs von fossilen Energieträgern und Kernbrennstoffen sowie CO<sub>2</sub>-Emissionen für die Bundesrepublik Deutschland (ohne ehemalige DDR) bis zum Jahr 2005 im Reduktionsszenario „Kernenergieausbau“

### 1.3 Die Reduktionsszenarien im Vergleich

Die von der Enquete-Kommission angestrebte CO<sub>2</sub>-Minderung in Höhe von 30 Prozent orientiert sich am Basiswert des Jahres 1987; die Größenordnung des Anpassungsbedarfs ist jedoch nur vor dem Hintergrund einer Referenzentwicklung, das heißt der bis zum Jahr 2005 ohne explizite CO<sub>2</sub>-Minderungsmaßnahmen zu erwartenden Entwicklung, zu bestimmen.

Das in 1.2 dargestellte Referenzszenario zeigt, daß gegenüber dem Jahr 1987 im Trend mit einer Reduktion der CO<sub>2</sub>-Emissionen um lediglich 4 Prozent bis zum Jahr 2005 gerechnet werden kann.

Damit wird aber deutlich, daß zur Erzielung von CO<sub>2</sub>-Reduktionszielen in der Größenordnung von 30 Prozent wesentlich weitergehende, letztlich im politischen Raum zu bestimmende Reduktionsstrategien formuliert und auch durchgesetzt werden müssen.

Grundlage für die Entwicklung derartiger Strategien sind neben der Evaluierung der zu ihrer Umsetzung erforderlichen Maßnahmen Kenntnisse über Art, Ausrichtung und Zielbeitrag der zur Verfügung stehenden Handlungsoptionen sowie deren Kosten und Nebenwirkungen.

Von der Kommission wurden drei Varianten, die Ausdruck der in Politik und Gesellschaft vertretenen Positionen sind, ausgewählt und analysiert. Sie orientieren sich am Ziel der Reduktion der CO<sub>2</sub>-Emission um 30 Prozent bis zum Jahr 2005:

- Reduktionsszenario „Energiepolitik“
- Reduktionsszenario „Kernenergieausstieg“
- Reduktionsszenario „Ausbau der Kernenergie“

In Tabelle 11 sind die Möglichkeiten der Reduktion klimarelevanter Spurengase für diese 3 Varianten im Überblick dargestellt.



**Vergleich der Emissionsminderungen energiebedingter klimarelevanter Spurengase<sup>1)</sup> in der Bundesrepublik Deutschland (ohne ehemalige DDR) für die drei Reduktionsszenarien für das Jahr 2005**

Spurengase	CO <sub>2</sub> in Mio. t	CH <sub>4</sub> <sup>2)</sup> in 1 000 t	NO <sub>x</sub> in 1 000 t	NMVOG in 1 000 t
Emissionen 1987 .....	715	1 797	2 599	1 530
<b>Reduktionsszenario Energiepolitik</b>				
– Emission .....	474	1 165	1 157	244
– Reduktion absolut .....	–241	–632	–1 442	–1 289
– Reduktion in % .....	– 33,7	– 35,2	– 55,5	– 84,2
<b>Reduktionsszenario Kernenergieausstieg 2005</b>				
– Emission .....	474	1 391	1 080	232
– Reduktion absolut .....	–241	–406	–1 519	–1 298
– Reduktion in % .....	– 33,7	– 22,6	– 58,4	– 84,9
<b>Reduktionsszenario Kernenergieausbau</b>				
– Emission .....	459	1 131	1 227	201
– Reduktion absolut .....	–256	–668	–1 372	–1 329
– Reduktion in % .....	– 35,8	– 40,9	– 52,8	– 86,6

<sup>1)</sup> Emissions-Reduktionen durch energiebewußtes Verhalten ist nur bei CO<sub>2</sub>-Emissionen berücksichtigt; CO<sub>2</sub> = Kohlendioxid, CH<sub>4</sub> = Methan, NO<sub>x</sub> = Stickoxide, NMVOG = flüchtige organische Verbindungen ohne Methan

<sup>2)</sup> Energiebedingte Methan-Emissionen einschließlich vorgelagerter Bereiche, aber ohne Abfallbereich. Reduktion von 350 000 Tonnen CH<sub>4</sub> durch freiwillige Vereinbarung mit Bergbau. Weitere Reduktionen sind durch energiebewußtes Verhalten, höhere Vereinbarungen mit dem Bergbau und abfallpolitische Maßnahmen möglich.

Es zeigt sich, daß mit Hilfe der drei Varianten CO<sub>2</sub>-Minderungen zwischen 241 Millionen Tonnen und 256 Millionen Tonnen, bezogen auf das Ausgangsniveau von 715 Millionen Tonnen im Jahre 1987, erreicht werden können. Dies entspricht einem Rückgang zwischen rund 34 und 36 Prozent. Damit kann das Ziel einer 30 prozentigen Reduktion der CO<sub>2</sub>-Emissionen bei allen Varianten erreicht werden, wobei sich allerdings die Eingriffstiefen der angenommenen Maßnahmen unterscheiden.

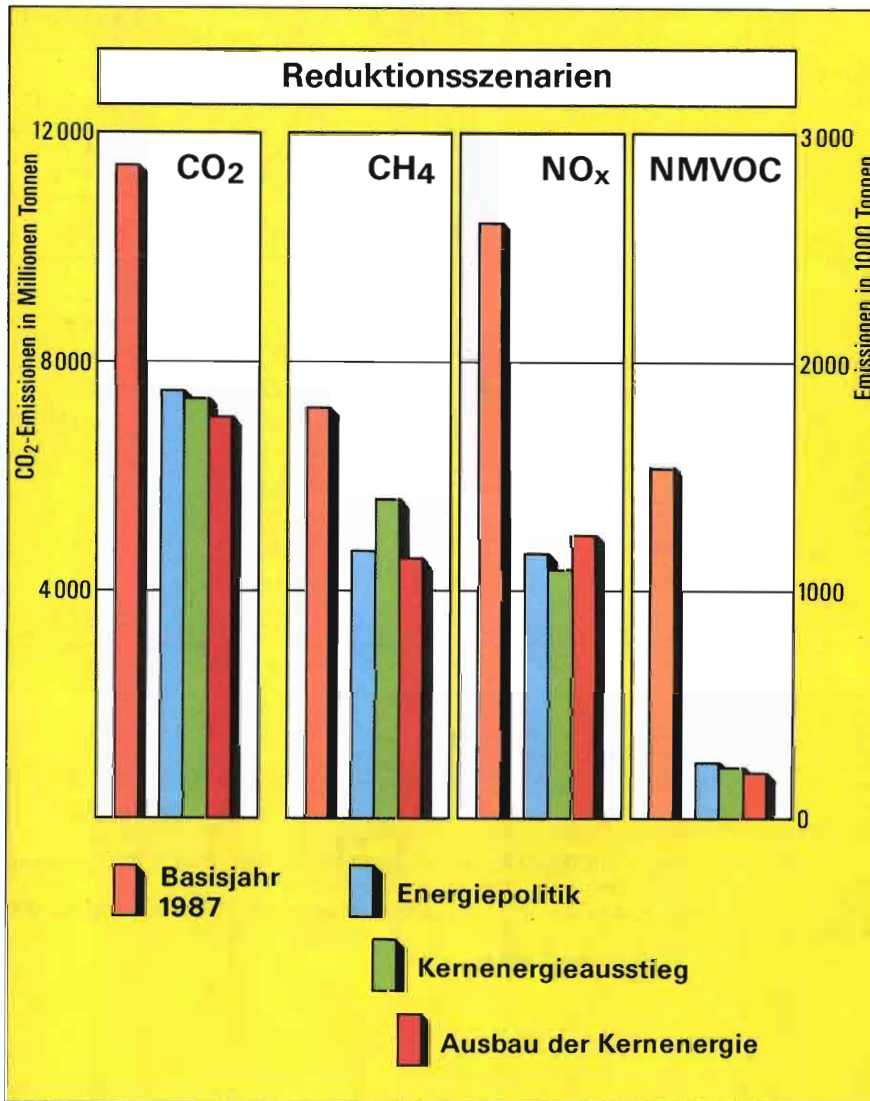


Abb. 8: Emissionsminderungen energiebedingter klimarelevanter Spurengase in der Bundesrepublik Deutschland (ohne ehemalige DDR) bis zum Jahr 2005 für die drei Reduktionsszenarien „Energiepolitik“, „Kernenergieausstieg 2005“ und „Ausbau der Kernenergie“

Aus den Tabellen 12 und 13 wird ersichtlich, daß sich in den einzelnen Varianten die Reduzierung der fossilen Energieträger und Kernbrennstoffe sowie der CO<sub>2</sub>-Emissionen unterschiedlich auf die einzelnen Sektoren des Endenergie- und Umwandlungsbereichs verteilt. So ergeben sich in der Variante Kernenergieausstieg besonders hohe Emissionsreduktionen im Endenergiebereich, in der Variante Ausbau der Kernenergie hingegen im Umwandlungsbereich. Dabei ist zu berücksichtigen, daß die Emissionsreduktionen in diesen Bereichen nicht unabhängig voneinander gesehen werden können, da Energieeinsparungen im Endenergiebereich auch zu Energie- und Emissionsreduktionen im vorgelagerten Umwandlungsbereich führen.

Es wird deutlich, daß bei allen Varianten innerhalb des Endenergiebereiches im Haushaltssektor und – mit etwas Abstand – im Kleinverbrauch die höchsten Emissionsreduktionspotentiale mobilisiert werden können. Dies ist Ausdruck des besonders hohen Emissionsreduktionspotentials im Raumwärmebereich und verdeutlicht die Notwendigkeit, auf diesem Gebiet vorrangig Maßnahmen einzuleiten.

Demgegenüber sinken die Emissionen in den Sektoren Industrie und Verkehr deutlich geringer beziehungsweise weisen in der Variante „Ausbau der Kernenergie“ einen geringen Anstieg auf. Ursache hierfür ist unter anderem das allen Varianten zugrundeliegende angenommene Wirtschaftswachstum von jährlich 2,4 Prozent sowie ein erheblicher Anstieg der Verkehrsleistungen.

**Verbrauch von fossilen Energieträgern und Kernbrennstoffen in den drei Reduktionsszenarien für die Bundesrepublik Deutschland (ohne ehemalige DDR) nach Sektoren**

in Petajoule (PJ) <sup>1)</sup>

	Basisjahr 1987	Reduktionsszenarien im Jahr 2005		
		Energiepolitik	Kernenergie- Ausstieg	Kernenergie- Ausbau
<b>Endenergiesektoren:</b>				
Haushalte .....	1 615	873	695	1 029
Kleinverbrauch .....	870	605	411	727
Industrie <sup>2)</sup> .....	1 782	1 833	1 664	1 891
Verkehr .....	1 961	1 732	1 642	1 968
nicht behandelte Sektoren .....	83	74	61	82
Substitution durch Kraft-Wärme- Kopplung .....	0	-309	-439	-171
<b>Summe Endenergiesektoren .....</b>	<b>6 311</b>	<b>4 808</b>	<b>4 034</b>	<b>5 526</b>
<b>Umwandlungssektoren:</b>				
Kraft-Wärme-Kopplung und Heizwerke	499	975	1 143	378
Sonstige Stromerzeugung .....	3 185	2 432	1 730	3 190
Sonstige Umwandlungssektoren und statistische Differenzen .....	442	281	235	235
<b>Summe Umwandlungssektoren .....</b>	<b>4 126</b>	<b>3 688</b>	<b>3 108</b>	<b>3 803</b>
<b>Zwischensumme Endenergiesektoren und Umwandlungsbereich .....</b>	<b>10 437</b>	<b>8 496</b>	<b>7 142</b>	<b>9 329</b>
<b>Reduktion in % <sup>3)</sup> .....</b>		<b>-18,6</b>	<b>-31,7</b>	<b>-10,6</b>
<b>Reduktion durch energiebewußtes Verhalten in % gegenüber 1987 <sup>4)</sup> ...</b>		<b>5</b>	<b>5</b>	<b>5</b>
<b>Gesamtsumme .....</b>	<b>10 437</b>	<b>7 976</b>	<b>6 620</b>	<b>8 807</b>
<b>Gesamtreduktion in % <sup>3)</sup> .....</b>		<b>-23,6</b>	<b>-36,7</b>	<b>-15,6</b>

<sup>1)</sup> Endenergieseitig berechnet, inklusive bundesdeutschem Anteil am internationalen Flugverkehr

<sup>2)</sup> Inklusive Brennstoffeinsatz für eigenerzeugten und selbstverbrauchten Strom

<sup>3)</sup> Aufgrund der Zielvorgabe einer CO<sub>2</sub>-Reduktion um 30 Prozent bis zum Jahr 2005 wurden für die Szenarien unterschiedlich intensive Maßnahmen angenommen, woraus Unterschiede in der Höhe der Energieeinsparung bei den verschiedenen Szenarien resultieren.

<sup>4)</sup> Die Kommission verzichtet auf eine szenariospezifische Differenzierung des Beitrags durch energiebewußtes Verhalten und setzt bei allen Szenarien pauschal 5 Prozent des jeweiligen Wertes des Jahres 1987 an.

Tabelle 12b

**Verbrauch von fossilen Energieträgern und Kernbrennstoffen in den drei Reduktionsszenarien für die Bundesrepublik Deutschland (ohne ehemalige DDR) nach Sektoren**  
in Millionen Tonnen SKE<sup>1)</sup>

	Basisjahr 1987	Reduktionsszenarien im Jahr 2005		
		Energiepolitik	Kernenergie- Ausstieg	Kernenergie- Ausbau
<b>Endenergiesektoren:</b>				
Haushalte .....	55,1	29,8	23,7	35,1
Kleinverbrauch .....	29,7	20,6	14,0	24,8
Industrie <sup>2)</sup> .....	60,8	62,5	56,8	64,5
Verkehr .....	66,9	59,1	56,0	67,1
nicht behandelte Sektoren .....	2,8	2,5	2,1	2,8
Substitution durch Kraft-Wärme- Kopplung .....	0,0	-10,5	-15,0	-5,8
<b>Summe Endenergiesektoren .....</b>	<b>215,3</b>	<b>164,0</b>	<b>137,6</b>	<b>188,5</b>
<b>Umwandlungssektoren:</b>				
Kraft-Wärme-Kopplung und Heizwerke	17,0	33,3	39,0	12,9
Sonstige Stromerzeugung .....	108,7	83,0	59,0	108,9
Sonstige Umwandlungssektoren und statistische Differenzen .....	15,1	9,6	8,0	8,0
<b>Summe Umwandlungssektoren .....</b>	<b>140,8</b>	<b>125,9</b>	<b>106,0</b>	<b>129,8</b>
<b>Zwischensumme Endenergiesektoren und Umwandlungsbereich .....</b>	<b>356,1</b>	<b>289,9</b>	<b>243,6</b>	<b>318,3</b>
<b>Reduktion in %<sup>3)</sup> .....</b>		<b>-18,6</b>	<b>-31,7</b>	<b>-10,6</b>
<b>Reduktion durch energiebewußtes Verhalten in % gegenüber 1987<sup>4)</sup> ...</b>		<b>5</b>	<b>5</b>	<b>5</b>
<b>Gesamtsumme .....</b>	<b>356,1</b>	<b>272,1</b>	<b>225,8</b>	<b>300,5</b>
<b>Gesamtreduktion in %<sup>3)</sup> .....</b>		<b>-23,6</b>	<b>-36,7</b>	<b>-15,6</b>

<sup>1)</sup> Endenergieseitig berechnet, inklusive bundesdeutschem Anteil am internationalen Flugverkehr

<sup>2)</sup> Inklusive Brennstoffeinsatz für eigenerzeugten und selbstverbrauchten Strom

<sup>3)</sup> Aufgrund der Zielvorgabe einer CO<sub>2</sub>-Reduktion um 30 Prozent bis zum Jahr 2005 wurden für die Szenarien unterschiedlich intensive Maßnahmen angenommen, woraus Unterschiede in der Höhe der Energieeinsparung bei den verschiedenen Szenarien resultieren.

<sup>4)</sup> Die Kommission verzichtet auf eine szenariospezifische Differenzierung des Beitrags durch energiebewußtes Verhalten und setzt bei allen Szenarien pauschal 5 Prozent des jeweiligen Wertes des Jahres 1987 an.

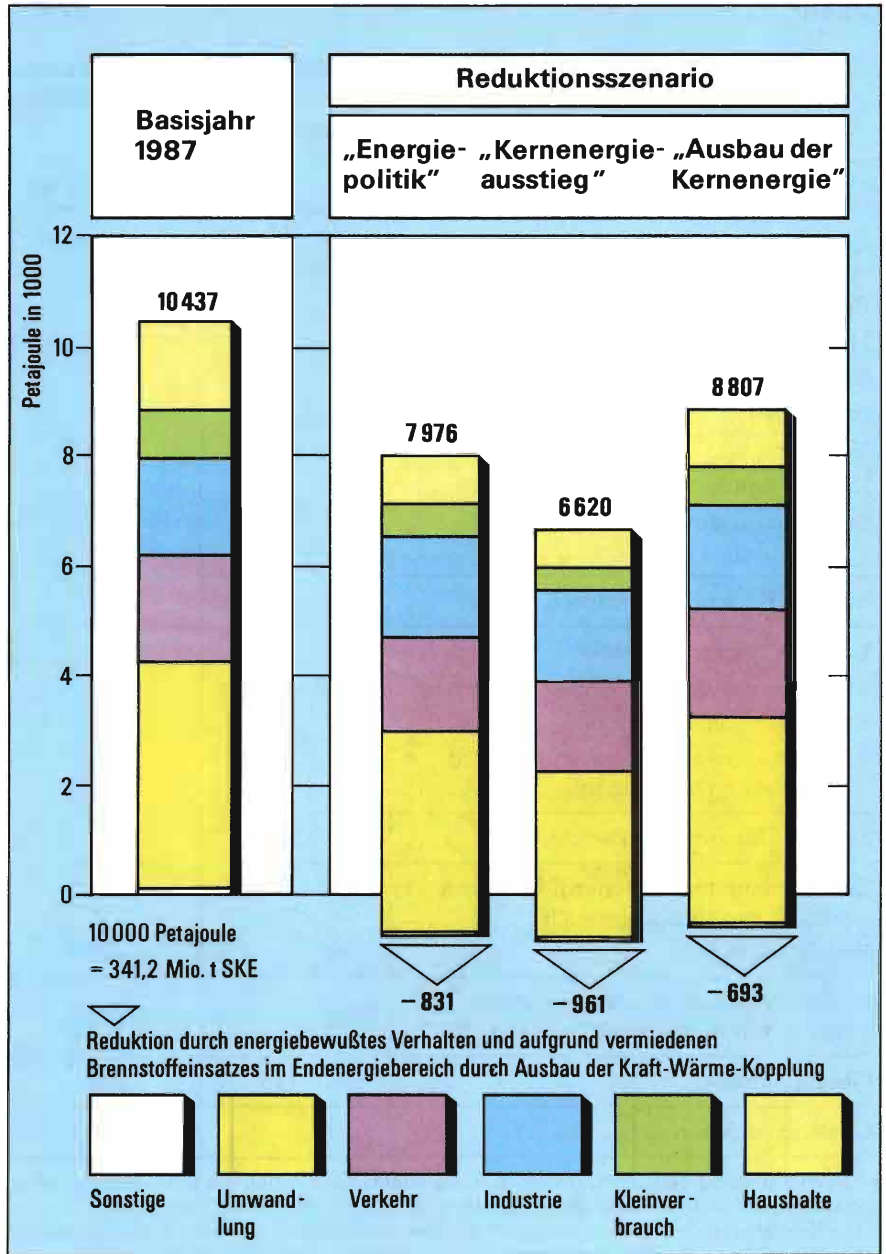


Abb. 9: Entwicklung des Verbrauchs von fossilen Energieträgern und Kernbrennstoffen in der Bundesrepublik Deutschland (ohne ehemalige DDR) bis zum Jahr 2005 in den drei Reduktionsszenarien „Energiepolitik“, „Kernenergieausstieg“ und „Ausbau der Kernenergie“

Tabelle 13

**CO<sub>2</sub>-Emissionen<sup>1)</sup>, unterteilt nach Sektoren, in den drei Reduktionsszenarien für die  
Bundesrepublik Deutschland (ohne ehemalige DDR)  
in Millionen Tonnen**

	Basisjahr 1987	Reduktionsszenarien im Jahr 2005		
		Energiepolitik	Kernenergie- Ausstieg	Kernenergie- Ausbau
<b>Endenergiesektoren:</b>				
Haushalte .....	113	52	41	62
Kleinverbrauch .....	60	36	24	40
Industrie <sup>2)</sup> .....	131	127	113	144
Verkehr .....	143	129	120	144
nicht behandelte Sektoren .....	6	9	5	5
Substitution durch Kraft-Wärme- Kopplung .....		-20	-29	-12
<b>Summe Endenergiesektoren .....</b>	<b>453</b>	<b>333</b>	<b>274</b>	<b>383</b>
<b>Umwandlungssektoren:</b>				
Kraft-Wärme-Kopplung und Heizwerke	45	71	82	16
Sonstige Stromerzeugung .....	189	94	140	82
Sonstige Umwandlungssektoren und statistische Differenzen .....	28	12	14	14
<b>Summe Umwandlungssektoren .....</b>	<b>262</b>	<b>177</b>	<b>236</b>	<b>112</b>
<b>Zwischensumme Endenergiesektoren und Umwandlungsbereich .....</b>	<b>715</b>	<b>510</b>	<b>510</b>	<b>495</b>
<b>Reduktion in %<sup>3)</sup> .....</b>		<b>-28,7</b>	<b>-28,7</b>	<b>-30,8</b>
<b>Reduktion durch energiebewußtes Verhalten in % gegenüber 1987<sup>3)</sup> ...</b>		<b>5</b>	<b>5</b>	<b>5</b>
<b>Gesamtsumme .....</b>	<b>715</b>	<b>474</b>	<b>474</b>	<b>459</b>
<b>Gesamtreduktion in % .....</b>		<b>-33,7</b>	<b>-33,7</b>	<b>-35,8</b>

<sup>1)</sup> Endenergieseitig berechnet, inklusive bundesdeutschem Anteil am internationalen Flugverkehr

<sup>2)</sup> Inklusive Brennstoffeinsatz für eigenerzeugten und selbstverbrauchten Strom

<sup>3)</sup> Die Kommission verzichtet auf eine szenariospezifische Differenzierung des Beitrags durch energiebewußtes Verhalten und setzt bei allen Szenarien pauschal 5 Prozent des jeweiligen Wertes des Jahres 1987 an.

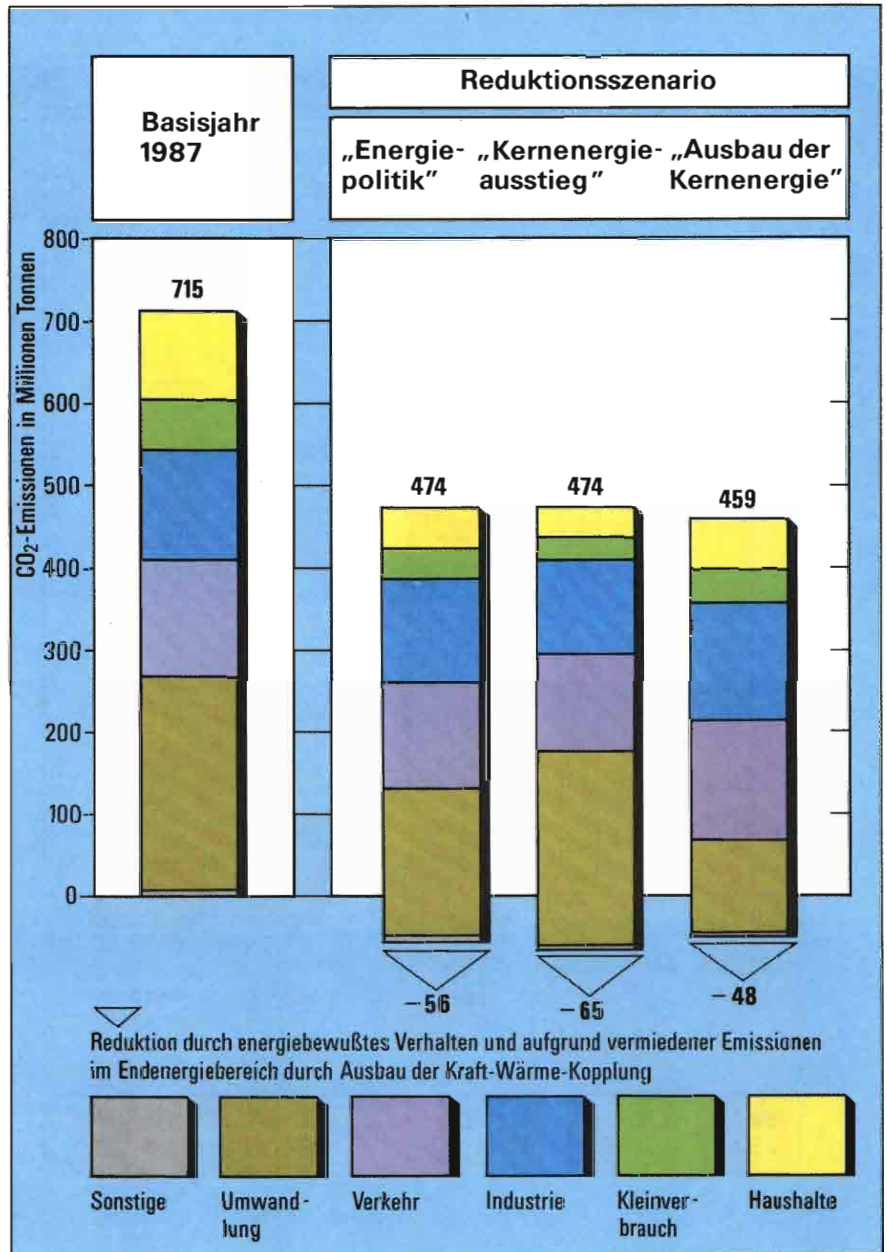


Abb. 10: Entwicklung der CO<sub>2</sub>-Emissionen, unterteilt nach Sektoren, in der Bundesrepublik Deutschland (ohne ehemalige DDR) bis zum Jahr 2005 in den drei Reduktionsszenarien „Energiepolitik“, „Kernenergieausstieg“ und „Ausbau der Kernenergie“

Tabelle 14 verdeutlicht die den einzelnen Szenarien zugrundegelegte Energieträgerstruktur. Der Gaseinsatz steigt in allen Varianten gegenüber dem Jahr 1987, am stärksten beim „Kernenergieausstieg“ um 48 Prozent, in der Variante „Energiepolitik“ um 20 Prozent und in der Variante „Ausbau der Kernenergie“ um 16 Prozent. Der Einsatz von Mineralölprodukten vermindert sich in der Variante „Energiepolitik“ um 37 Prozent, in der Variante „Kernenergieausstieg“ um 54 Prozent und in der Variante „Ausbau der Kernenergie“ um 33 Prozent. Der Verbrauch von Stein- und Braunkohlen sinkt in der Variante „Energiepoli-

tik“ um 38 Prozent beziehungsweise 39 Prozent, in der Variante „Kernenergieausstieg“ um 25 Prozent beziehungsweise 46 Prozent und in der Variante „Ausbau der Kernenergie“ um 42 Prozent beziehungsweise 55 Prozent. Entsprechend dem Aufbau der Varianten ist die Entwicklung des Einsatzes von Kernbrennstoffen unterschiedlich: Die Energiepolitikvariante geht von der Beibehaltung der derzeitigen Kapazität der Kernkraftwerke aus, wobei sich der Brennstoffeinsatz durch eine höhere Auslastung der Kernkraftwerke um 16 Prozent erhöht. Bei der Variante „Ausstieg aus der Kernenergie“ sinkt der Brennstoffeinsatz bis zum Jahr

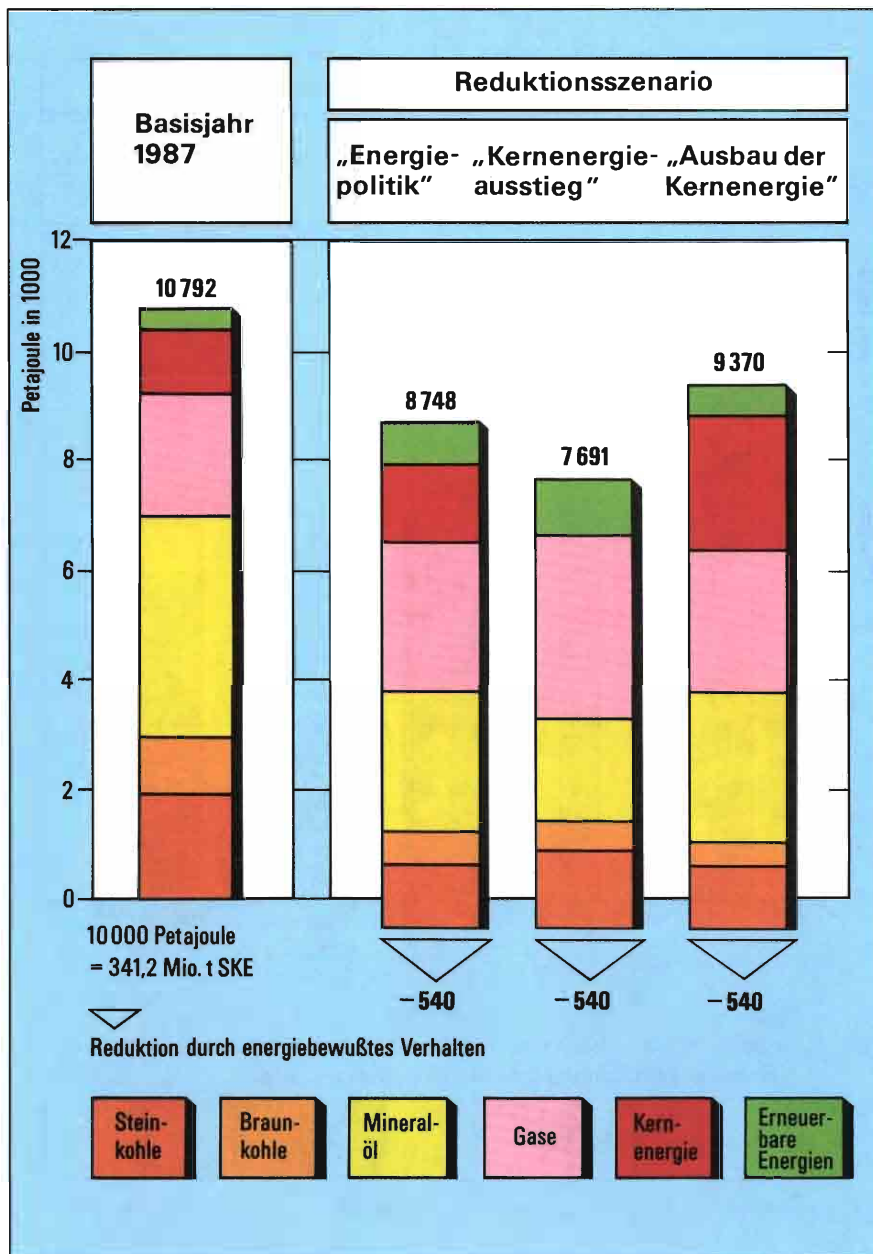


Abb. 11: Entwicklung des Energieverbrauchs, unterteilt nach Energieträgern, in der Bundesrepublik Deutschland (ohne ehemalige DDR) bis zum Jahr 2005 in den drei Reduktionsszenarien „Energiepolitik“, „Kernenergieausstieg“ und „Ausbau der Kernenergie“

des Ausstiegs auf Null. Bei der Variante „Ausbau der Nutzung der Kernenergie“ wird der Einsatz der Nuklearanlagen bis zum Jahr 2005 knapp verdoppelt.

Betrachtet man die Gesamtsumme des Energieverbrauchs – die aufgrund der Nichtberücksichtigung des nichtenergetischen Verbrauchs und des Energieaußenhandels nicht mit der Summe der Primärenergie identisch ist –, dann zeigen sich die Unterschiede in der Energieeinsparung bei den einzelnen Varianten: Wegen der Zielvorgabe einer CO<sub>2</sub>-Reduktion um 30 Prozent wurden für die Szenarien unterschiedlich intensive Maßnahmen in den einzelnen Bereichen angenommen, woraus Unterschiede zwischen den Szenarien bezüglich der Höhe der Energieeinsparung re-

sultieren. Diese beträgt bei der Variante „Energiepolitik“ 14 Prozent, bei der Variante „Kernenergieausstieg“ 24 Prozent und bei der Variante „Ausbau der Kernenergie“ 9 Prozent. Allerdings sind in diesen Zahlen die Energieeinsparungen durch energiebewusstes Verhalten noch nicht enthalten, die für jede Variante mit 5 Prozentpunkten gegenüber 1987 angesetzt werden.

Ein Problem des Variantenvergleichs besteht im Ausmaß und in der Qualität der vorliegenden Kostangaben. Nicht für alle Bereiche liegen hinreichend spezifizierte Kostangaben vor. Ferner müßten die angegebenen Kosten zum Teil einer Sensitivitätsanalyse unterzogen werden, um in allen Fällen zu einer höheren Belastbarkeit der Daten zu gelangen. Hinzu



Tabelle 14a

**Gesamter Energieverbrauch, unterteilt nach Energieträgern<sup>1)</sup>, in den drei Reduktionsszenarien für die Bundesrepublik Deutschland (ohne ehemalige DDR)**

in Petajoule (PJ)

Energieträger	Basisjahr 1987	Reduktionsszenarien im Jahr 2005		
		Energiepolitik	Kernenergie- Ausstieg	Kernenergie- Ausbau
Steinkohlen .....	1 878	1 155	1 404	1 092
Braunkohlen .....	1 016	617	548	453
Mineralölprodukte .....	4 060	2 552	1 857	2 725
Gase .....	2 250	2 709	3 331	2 620
<b>Summe fossile Energieträger .....</b>	<b>9 204</b>	<b>7 033</b>	<b>7 140</b>	<b>6 890</b>
Wasserkraft .....	184	220	215	214
Kernenergie .....	1 233	1 428	0	2 439
Windenergie .....	0	43	88	12,3
Photovoltaik .....	0	5	16	0,3
Stromimportsaldo etc. ....	36	36	32	34,2
erneuerbare Energiequellen im Endenergiebereich .....	135	523	740	320
<b>Zwischensumme<sup>2)</sup> .....</b>	<b>10 792</b>	<b>9 288</b>	<b>8 231</b>	<b>9 910</b>
Reduktion in % <sup>3)</sup> .....		13,9	23,7	8,2
Reduktion durch energiebewußtes Verhalten gegenüber 1987 <sup>4)</sup> .....		-540	-540	-540
<b>Gesamtsumme<sup>2)</sup> .....</b>	<b>10 792</b>	<b>8 748</b>	<b>7 691</b>	<b>9 370</b>
<b>Gesamtreduktion in %<sup>3)</sup> .....</b>		<b>18,9</b>	<b>28,7</b>	<b>13,2</b>

1) Abweichungen vom Primärenergieverbrauch durch Nichtberücksichtigung des nichtenergetischen Verbrauchs, des sonstigen Energieaußenhandels etc.

2) bewertet mit den substituierten Energieträgern

3) Aufgrund der Zielvorgabe einer CO<sub>2</sub>-Reduktion um 30 Prozent bis zum Jahr 2005 wurden für die Szenarien unterschiedlich intensive Maßnahmen angenommen, woraus Unterschiede in der Höhe der Energieeinsparung bei den verschiedenen Szenarien resultieren.

4) Die Kommission verzichtet auf eine szenariospezifische Differenzierung des Beitrags durch energiebewußtes Verhalten und setzt bei allen Szenarien pauschal 5 Prozent des jeweiligen Wertes des Jahres 1987 an.

kommt, daß eine Kostenoptimierung in einer systemaren Betrachtung noch nicht geleistet werden konnte. Die angegebenen Nettogesamtkosten der drei Varianten, die bei 2,7 Mrd. DM pro Jahr für die Variante „Energiepolitik“, bei 9,4 Milliarden DM pro Jahr für die Variante „Kernenergieausstieg“ und bei Ersparnissen von 4,8 Mrd. DM pro Jahr für die Variante „Ausbau der Kernenergie“ liegen, sind umstritten und können daher nicht als exakte Kostenunterschiede zwischen den Varianten interpretiert werden. Sie liefern lediglich eine Abschätzung über die Größenordnung der Kosten bei einer Reduktion der CO<sub>2</sub>-Emissionen um 30 Prozent. Des weiteren beziehen sich diese Kostenangaben alle auf die Referenzpreisentwicklung ohne Preispolitik (vgl. Tabelle 1), so daß sich bei einer Kalkulation mit den in den Varianten „Energiepolitik“ und „Kernenergieausstieg“ angenommenen preispolitischen Maßnahmen günstigere Werte ergeben würden.

Andererseits werden keine Angaben zu dem volkswirtschaftlichen Nutzen einer dreißigprozentigen Reduktion der Kohlendioxid-Emissionen gemacht, die neben anderen vermiedenen sozialen Kosten der Energieumwandlung den „Nettokosten“ gegenübergestellt werden müßten.

Mit der dargelegten strukturellen Entwicklung des Energieverbrauchs sind bei allen Varianten gravierende Umschichtungsprozesse sowohl in den Umwandlungs- wie in den Endenergiesektoren verbunden. Angesichts des relativ kurzen Zeitraums bis zum Jahre 2005 muß bei allen Maßnahmen darauf geachtet werden, Anpassungsprozesse dieses Ausmaßes ohne größere Friktionen abzuwickeln. Es ist daher zu ermitteln, auf welche Weise die erforderlichen wirtschafts-, energie-, beschäftigungs- und regionalpolitischen Umstrukturierungsprozesse, vor allem in den Regionen des heimischen Steinkohlen- und Braun-

Tabelle 14b

**Gesamter Energieverbrauch, unterteilt nach Energieträgern<sup>1)</sup>, in den drei Reduktionsszenarien für die Bundesrepublik Deutschland (ohne ehemalige DDR)**

in Millionen Tonnen SKE

Energieträger	Basisjahr 1987	Reduktionsszenarien im Jahr 2005		
		Energiepolitik	Kernenergie- Ausstieg	Kernenergie- Ausbau
Steinkohlen .....	64,1	39,4	47,9	37,3
Braunkohlen .....	34,7	21,1	18,7	15,5
Mineralölprodukte .....	138,4	87,1	63,4	93,0
Gase .....	76,8	92,4	113,7	89,3
<b>Summe fossile Energieträger .....</b>	<b>314,0</b>	<b>240,0</b>	<b>243,7</b>	<b>235,1</b>
Wasserkraft .....	6,3	7,5	7,3	7,3
Kernenergie .....	42,1	48,7	0,0	83,2
Windenergie .....	0,0	1,5	3,0	0,4
Photovoltaik .....	0,0	0,2	0,5	0,0
Stromimportsaldo etc. ....	1,2	1,2	1,1	1,2
erneuerbare Energiequellen im Endenergiebereich .....	4,6	17,8	25,2	10,9
<b>Zwischensumme<sup>2)</sup> .....</b>	<b>368,2</b>	<b>316,9</b>	<b>280,8</b>	<b>338,1</b>
Reduktion in % <sup>3)</sup> .....		13,9	23,7	8,2
Reduktion durch energiebewußtes Verhalten gegenüber 1987 <sup>4)</sup> .....		-18,4	-18,4	-18,4
<b>Gesamtsumme<sup>2)</sup> .....</b>	<b>368,2</b>	<b>298,5</b>	<b>262,4</b>	<b>319,7</b>
<b>Gesamtreduktion in %<sup>3)</sup> .....</b>		<b>18,9</b>	<b>28,7</b>	<b>13,2</b>

<sup>1)</sup> Abweichungen vom Primärenergieverbrauch durch Nichtberücksichtigung des nichtenergetischen Verbrauchs, des sonstigen Energieaußenhandels etc.

<sup>2)</sup> bewertet mit den substituierten Energieträgern

<sup>3)</sup> Aufgrund der Zielvorgabe einer CO<sub>2</sub>-Reduktion um 30 Prozent bis zum Jahr 2005 wurden für die Szenarien unterschiedlich intensive Maßnahmen angenommen, woraus Unterschiede in der Höhe der Energieeinsparung bei den verschiedenen Szenarien resultieren.

<sup>4)</sup> Die Kommission verzichtet auf eine szenariospezifische Differenzierung des Beitrags durch energiebewußtes Verhalten und setzt bei allen Szenarien pauschal 5 Prozent des jeweiligen Wertes des Jahres 1987 an.

kohlenbergbaus, sozialverträglich gestaltet werden können.

Die genannten Reduktionsziele für das Jahr 2005 gelten unter der Voraussetzung, daß die angenommene Bevölkerungszahl der Bundesrepublik Deutschland (ohne ehemalige DDR) im Jahr 2005 60 Millionen Einwohner nicht wesentlich überschreitet. Wanderbewegungen von und zur ehemaligen DDR haben für diese Fragestellung insofern keine Auswirkungen, da die Reduktionsquoten auch für die Bundesrepublik Deutschland nach dem Beitritt der ehemaligen DDR gelten sollen.

Anders verhält es sich, wenn die Bevölkerungszahl im Jahr 2005 durch nennenswerte Zuwanderungen aus Drittländern wesentlich gestiegen sein sollte. Für den Fall, daß aufgrund von Migrationen die angenommene Bevölkerungszahl der Bundesrepublik Deutschland im Jahr 2005 wesentlich über dem ge-

genwärtigen Wert liegt, wäre dies mit einem entsprechend höheren Energieverbrauch und erhöhten Emissionen verbunden.

Nach neueren Untersuchungen muß insgesamt damit gerechnet werden, daß die Bundesrepublik Deutschland (ohne Gebiet der ehemaligen DDR) im Jahr 2005 etwa 63,5 Millionen Einwohner (Studie des Instituts der Deutschen Wirtschaft, IW, wobei die Zahl der Asylbewerber differenziert berücksichtigt werden muß) oder etwa 65 Millionen Einwohner (Studie des Deutschen Instituts für Wirtschaftsforschung, DIW) hat. Diesem Umstand muß insofern Rechnung getragen werden, als in internationalen und nationalen Verpflichtungen über die Höhe der Reduktionsziele entsprechende Vorbehalte gemacht werden müßten.

Unsicherheiten bestehen über die Höhe der zusätzlichen, im Studienprogramm der Enquete-Kommission nicht abgeschätzten Emissionsreduktionspotentiale.

So wird zum Beispiel in isolierter Betrachtung ein realisierbares Minderungspotential der CO<sub>2</sub>-Emissionen in Höhe von 65 Millionen Tonnen durch verbesserte interne und externe Wärmenutzung sowie durch abfallwirtschaftliche Maßnahmen (Abfallvermeidung, Recycling etc.) zur Vermeidung und stofflichen Verwertung für möglich gehalten. Nach ersten Schätzungen reduziert sich dieses Potential allerdings auf etwa die Hälfte, wenn man die Überschneidungen mit den für die Enquete-Kommission angefertigten Studien berücksichtigt.

Es ist einerseits nicht ausgeschlossen, daß – insbesondere wenn Strategien zur Reduktion der Emissionen weltweit eingeschlagen werden – das Energiepreisniveau für Erdöl und Kohle auf dem Weltmarkt weniger steigt als angenommen, und daß sich im Gegenzug die Preise für kohlenstoffärmere Energieträger, wie Erdgas, überproportional erhöhen. Andererseits stellt sich die Frage, wie sich ohne Preissteigerung für fossile Energieträger die notwendige Reduktion bewerkstelligen läßt. Die zu treffenden Maßnahmen sind daher im Zeitablauf auf ihre Wirksamkeit und eventuell veränderte Rahmenbedingungen zu überprüfen und gegebenenfalls entsprechend anzupassen.

Schließlich ist zu beachten, daß sich mit der Vereinigung Deutschlands wegen der gegenwärtigen Energiestruktur in der ehemaligen DDR veränderte Reduktionsbeiträge in den einzelnen Sektoren ergeben. Allerdings kann auch unter besonderer Berücksichtigung der Situation in der ehemaligen DDR die Höhe des Reduktionsziels von 30 Prozent erreicht werden, da sich bereits zum gegenwärtigen Zeitpunkt auch dort die entsprechenden Reduktionsmöglichkeiten abzeichnen.

## **2. Nationale Handlungsempfehlungen zur Reduktion der Emissionen energiebedingter klimarelevanter Spurengase**

Im folgenden stellt die Kommission die nationalen Handlungsempfehlungen zur Reduktion der Emissionen energiebedingter klimarelevanter Spurengase dar. Diese einvernehmlich von der Kommission befürworteten Empfehlungen sind auch in Abschnitt A wiedergegeben (vgl. Abschnitt A, 4. Kapitel). Die internationalen Handlungsempfehlungen zur Reduktion der energiebedingten klimarelevanten Spurengase befinden sich in Abschnitt A, 3. Kapitel, sowie in den Abschnitten F und G.

Am Ende des Abschnittes E werden ergänzend detaillierter Handlungsempfehlungen wiedergegeben, die nicht einvernehmlich beschlossen wurden und namentlich gekennzeichnet sind.

Die wissenschaftlichen Erkenntnisse über den Abbau der Ozonschicht in der Stratosphäre und deren Folgen, den zusätzlichen Treibhauseffekt und die dadurch ausgelösten Klimaänderungen und Folgewirkungen sowie damit zusammenhängend die Rolle des Energiebereichs einschließlich des Verkehrs haben sich so weit verdichtet und sind in den wesentlichen Grundaussagen so eindeutig, daß sie keinen Zweifel

daran lassen, daß – unabhängig von der Notwendigkeit weiterer Forschungen – unter Vorsorgegesichtspunkten sofort gehandelt werden muß. Dies betrifft – neben den bereits international begonnenen und noch zu intensivierenden Maßnahmen zur Reduktion der FCKW und weiterer ozonzerstörender Substanzen – insbesondere Maßnahmen zur Reduktion der energiebedingten klimarelevanten Spurengase und zum Schutz der tropischen Wälder.

Die Kommission fordert den Deutschen Bundestag und die Bundesregierung auf, als wirksamste Strategie mit dem Ziel einer wechselseitigen Verstärkung sowohl das bisherige internationale als auch das bisherige nationale Vorgehen zum Schutz der Erdatmosphäre erheblich auszuweiten, das heißt, sich insbesondere auf internationaler und EG-weiter Ebene für weitreichende Maßnahmen zur Reduktion der energiebedingten klimarelevanten Spurengasemissionen einzusetzen, entsprechende Maßnahmen anderer Länder im gebotenen Umfang zu unterstützen und auf nationaler Ebene weitreichende Maßnahmen in diesem Bereich durchzuführen.

Dabei ist darauf zu achten, daß Maßnahmen zum Schutz der Erdatmosphäre keine Verlagerung von Folgeschäden oder Risiken auf andere Bereiche nach sich ziehen. Stattdessen ist anzustreben, daß die zu treffenden Maßnahmen zur Reduktion der Emission klimarelevanter Spurengase auch weiteren Kriterien der Umwelt- und Sozialverträglichkeit genügen und sich das Risiko- und Schadenspotential insgesamt verringert.

Alle Staaten sind aufgerufen, neben dem internationalen Vorgehen umgehend nationale Sofortprogramme und Langfriststrategien zum Schutz der Erdatmosphäre einzuleiten. Das für die Lösung des Problems notwendige internationale Vorgehen darf nicht dazu verleiten, bis zum Abschluß entsprechender internationaler Vereinbarungen mit dem Handeln auf nationaler Ebene zu warten.

Die Enquete-Kommission hält es daher angesichts des aktuellen wissenschaftlichen Kenntnisstandes und nach dem Vorsorgeprinzip für notwendig, geeignete Maßnahmen zur Eindämmung des zusätzlichen Treibhauseffektes auch im nationalen Rahmen unverzüglich einzuleiten. Dabei darf die Einbettung der Bundesrepublik Deutschland in die EG-Entwicklung nicht verlorengehen. Die Bundesrepublik Deutschland muß beispielgebend sein, ohne Wettbewerbspositionen zu verlieren. Über das EG-weit abgestimmte Vorgehen hinaus sieht es die Kommission als dringend erforderlich an, daß Bundestag und Bundesregierung geeignete Schritte unternehmen, die es ermöglichen, mit der Durchführung nationaler Maßnahmen eine Vorreiterrolle zu übernehmen.

Die Kommission weist in diesem Zusammenhang darauf hin, daß viele Maßnahmen, die zur Verringerung der klimarelevanten Spurengase getroffen werden müssen, mit positiven Begleiteffekten verbunden sind. So ist beispielsweise eine Reduktion der Ozonkonzentration der Troposphäre, die aus Gründen der Eindämmung des Treibhauseffektes zu erfolgen hat, auch gleichzeitig sinnvoll zur Vermeidung von Schäden an der Gesundheit der Menschen und an den Wäldern.

Die Erschließung eines möglichst großen Minderungspotentials der Emissionen von Kohlendioxid, Methan, Stickoxiden, Kohlenmonoxid, Distickstoffoxid und flüchtigen organischen Verbindungen (ohne Methan) ist daher ohnehin vorteilhaft und notwendig. Dieser Aspekt gewinnt noch an Bedeutung, wenn alle langfristigen und externen Kosten und Schäden berücksichtigt werden. Dies gilt für alle Bereiche und ganz besonders für die Bereiche Energie, Landwirtschaft und Chemie.

Es ist erforderlich, die heutige Energieversorgung angesichts der dargestellten Problemlage grundlegend zu modernisieren und dabei Möglichkeiten und Realisierungswege zu finden, negative Folgewirkungen zu minimieren oder zu beseitigen. Dazu existiert ein großer Handlungs-, Entscheidungs-, Forschungs- und Entwicklungsbedarf, so daß die Aufgabe, die aus dem Energiebereich stammenden Spurengasemissionen zu reduzieren, als zentrale Querschnittsaufgabe von Politik, Wirtschaft, Forschung und Technologie anzusehen ist.

Da die Kommission den Themenkomplex Landwirtschaft-Klima-Erdatmosphäre noch nicht intensiv bearbeitet hat, empfiehlt sie, dazu in der nächsten Wahlperiode notwendige und geeignete Maßnahmen zu erarbeiten. Diese Maßnahmen sind unter der Vorgabe der Minimierung der zu erwartenden Schäden der Klimaänderungen und anderer Einflußgrößen für die Ökosysteme, die Landwirtschaft und die Lebensmittelversorgung zu untersuchen mit dem Ziel, neben internationalen auch nationale Strategien zum Schutz der Ökosysteme, des Bodens und Wassers sowie zur Sicherung einer ökologie- und klimaverträglichen, ausreichenden und hochwertigen Lebensmittelversorgung zu entwickeln.

## 2.1 Reduktionsziele für die energiebedingten klimarelevanten Spurengasemissionen

Die Kommission empfiehlt, daß die im folgenden genannten prozentualen Ziele zur Reduktion der energiebedingten klimarelevanten Spurengase für die Bundesrepublik Deutschland einschließlich des Gebietes der ehemaligen DDR gelten sollen. Hierbei können sich wegen der gegenwärtigen Energiestruktur und der Bedingungen auf dem Gebiet der bisherigen DDR veränderte Reduktionsbeiträge in den einzelnen Sektoren gegenüber den im Studienprogramm der Kommission ermittelten Werte ergeben. Die Summe der empfohlenen prozentualen Reduktionsziele soll aber auch nach dem Beitritt der DDR unverändert bleiben.

Es ist notwendig, den Kabinettsbeschuß zur Verminderung der CO<sub>2</sub>-Emissionen vom 13. Juni 1990, der auf der Grundlage des Studienprogramms der Kommission erarbeitet wurde, auszuweiten, zu verschärfen und in Maßnahmenprogrammen dahin gehend zu konkretisieren, daß

- bis zum Jahr 2005 die CO<sub>2</sub>-Emission um mindestens 30 Prozent reduziert wird;
- in bezug auf die weiteren energiebedingten klimarelevanten Spurengase die Emissionen von Methan (CH<sub>4</sub>) um mindestens 30 Prozent, von Stickoxiden (NO<sub>x</sub>) um mindestens 50 Prozent, von Kohlenmonoxid (CO) um mindestens 60 Prozent und von flüchtigen organischen Verbindungen ohne Methan (NMVOC) um mindestens 80 Prozent bis zum Jahr 2005 vermindert werden.

30 Prozent Reduktion der CO<sub>2</sub>-Emissionen entspricht – ausgehend von einer Emission von 715 Millionen

Tabelle 15

### Reduktionsplan der Enquete-Kommission zur Verringerung der CO<sub>2</sub>-Emissionen der Bundesrepublik Deutschland für das Jahr 2005 (verbindliches Reduktionsziel), sowie Zielorientierungen für die Jahre 2020 und 2050;

Alle Angaben in Millionen Tonnen CO<sub>2</sub>

Die angegebenen Prozentpunkte beziehen sich auf das Basisjahr 1987

	Basisjahr 1987	1. Stufe: 1987 bis 2005 Reduktionsziel: -30 %	2. Stufe 2006 bis 2020 Zielorientierung zusätzlich: -20 %	3. Stufe 2021 bis 2050 Zielorientierung zusätzlich: -30 %	1. bis 3. Stufe 1987 bis 2050 Zielorientierung insgesamt: -80 %
Bundesrepublik Deutschland . . . . . (ohne ehemalige DDR) . . . . .	715	-215 auf 500	-143 auf 357	-215 auf 142	-573 auf 142
Bundesrepublik Deutschland . . . . . (einschließlich der ehemaligen DDR) .	1 067 <sup>1)</sup>	-317 auf 750	-213 auf 543	-320 auf 214	-853 auf 214

<sup>1)</sup> Vorläufiger Wert

Tonnen CO<sub>2</sub> im Basisjahr 1987 aus dem damaligen Gebiet der Bundesrepublik Deutschland – einer Verminderung um 215 Millionen Tonnen CO<sub>2</sub> auf 500 Millionen Tonnen CO<sub>2</sub> im Jahr 2005.

Für die Bundesrepublik Deutschland einschließlich der ehemaligen DDR bedeutet das Reduktionsziel von 30 Prozent bis zum Jahr 2005 eine Verminderung der CO<sub>2</sub>-Emissionen um 317 Mio. t auf 750 Mio. t, ausgehend von 1067 Mio.t im Jahr 1987<sup>1)</sup>.

Priorität bei diesem Reduktionsplan haben Maßnahmen zur Verbesserung der Energieeffizienz, zur rationelleren Energienutzung und -umwandlung, zur Energieeinsparung sowie zum Ausbau der Nutzung erneuerbarer Energien. Diese Prioritätensetzung hat die Kommission bereits in ihrem ersten Bericht vorgenommen. Sie wurde durch die Ergebnisse des Studienprogramms bestätigt und ist zwischenzeitlich innerhalb der Bundesrepublik Deutschland und der internationalen Diskussion auf breiten Konsens gestoben.

Die Reduktion der CO<sub>2</sub>-Emission um mindestens 50 Prozent weltweit bis zum Jahr 2050, die die Kommission gegenwärtig zur Eindämmung des zusätzlichen Treibhauseffektes als notwendig erachtet, würde für

<sup>1)</sup> Dabei ist zu berücksichtigen, daß der Wert von 715 Mio. t CO<sub>2</sub>-Emissionen im Jahr 1987 für die Bundesrepublik Deutschland von den internationalen Statistiken mit einem Wert von 754 Mio. t (im Jahr 1986) für die energiebedingte CO<sub>2</sub>-Emissionen (ohne nichtenergetischen Energieverbrauch) abweicht. Aus Konsistenzgründen wird in diesem Bericht der Wert von 715 Mio. t CO<sub>2</sub> im Jahr 1987, den die für die Kommission angefertigten Studien ermittelt haben, durchgängig verwendet und auf das Problem der möglichst schnell verfügbaren, abgestimmten Datenerhebungen hingewiesen. Für die DDR wurde vorläufig der von den internationalen Statistiken für das Jahr 1986 ausgewiesene Wert von 352 Mio. t CO<sub>2</sub> verwendet und als gleichbleibend für das Jahr 1987 angenommen.

die Industrieländer und damit auch die Bundesrepublik Deutschland bedeuten, ihre CO<sub>2</sub>-Emissionen um eine Größenordnung von 80 Prozent bis zum Jahr 2050 zu vermindern. Die Kommission ersucht daher die Bundesregierung, durch langfristige Untersuchungen zu prüfen, wie die Zielorientierung einer Verringerung der Emission

- von Kohlendioxid und Methan bis zum Jahr 2020 um etwa 50 Prozent und bis zum Jahr 2050 um etwa 80 Prozent erreichbar ist. Auf dieser Basis sind entsprechende langfristige Strategien und Maßnahmenprogramme zur Erreichung solcher Zielorientierungen zu entwickeln.

Außerdem ist durch entsprechende Untersuchungen zu prüfen, wie die Emissionen von

- Stickoxiden bis zum Jahr 2020 um mindestens 70 Prozent und bis zum Jahr 2050 um mindestens 90 Prozent,
- des Kohlenmonoxids bis zum Jahr 2020 um mindestens 75 Prozent und bis zum Jahr 2050 um mindestens 90 Prozent sowie
- die Emissionen der flüchtigen organischen Verbindungen (ohne Methan) bis zum Jahr 2020 um mindestens 90 Prozent und bis zum Jahr 2050 um mindestens 95 Prozent zu reduzieren sind.

Die Kommission hält die genannten Verminderungen der Emissionen bis zum Jahr 2005 aufgrund der Ergebnisse des von ihr durchgeführten Studienprogramms für realisierbar, wenn die erforderlichen Maßnahmen konkretisiert, eingeleitet und schnellstmöglichst umgesetzt werden.

Die genannten Reduktionsziele für das Jahr 2005 wurden im Studienprogramm der Enquete-Kommission nur für die bisherige Bundesrepublik Deutschland (ohne ehemalige DDR) ermittelt. Dabei wurde ange-

Tabelle 16

**Reduktionsplan der Enquete-Kommission zur Verminderung der energiebedingten klimarelevanten Spurengasemissionen der Bundesrepublik Deutschland für das Jahr 2005 (verbindliches Reduktionsziel) sowie für die Jahre 2020 und 2050 (Zielorientierung)**

Spurengase	Ausgangswerte: Emissionen im Basis- jahr 1987 <sup>1)</sup> in Mio. t (gerundet)	Reduktions- ziel: Reduktion bis 2005 in % gegenüber 1987	Zielorien- tierung: Reduktion bis 2020 in % gegenüber 1987	Zielorien- tierung: Reduktion bis 2050 in % gegenüber 1987
Kohlendioxid (CO <sub>2</sub> )	715	-30	-50	-80
Methan (CH <sub>4</sub> )	1,8	-30	-50	-80
Stickoxide (NO <sub>x</sub> )	2,6	-50	-70	-90
Kohlenmonoxid (CO)	8	-60	-75	-90
flüchtige organische Verbindungen ohne Methan (NMVOC)	1,5	-80	-90	-95

<sup>1)</sup> Die Ausgangswerte des Jahre 1987 sind aufgrund der exakteren Datenlage nur für die Bundesrepublik Deutschland (ohne ehemalige DDR) angegeben; die prozentualen Reduktionen beziehen sich auf die Bundesrepublik Deutschland einschließlich der ehemaligen DDR.

nommen, daß die Bevölkerungszahl der Bundesrepublik Deutschland (ohne ehemalige DDR) im Jahr 2005 60 Millionen Einwohner nicht wesentlich überschreitet. Wanderbewegungen von und in die bisherige DDR haben insofern für diese Fragestellung keine Auswirkung, als die prozentualen Reduktionsquoten auch für die Bundesrepublik Deutschland (einschließlich der DDR nach ihrem Beitritt) gelten sollen.

Zusätzlich muß berücksichtigt werden, daß die Bevölkerungszahl im Jahr 2005 durch nennenswerte Zuwanderungen aus Drittländern wesentlich höher liegen kann. Für den Fall, daß die angenommene Bevölkerungszahl der Bundesrepublik Deutschland bis zum Jahr 2005 wesentlich über dem gegenwärtigen Wert liegt, wäre dies mit einem entsprechend höheren Energieverbrauch und erhöhten Emissionen verbunden. Nach neueren Untersuchungen muß insgesamt damit gerechnet werden, daß die Bundesrepublik Deutschland (ohne Gebiet der ehemaligen DDR) im Jahr 2005 rund 63,5 Mio. Einwohner (Studie des Instituts der Deutschen Wirtschaft, IW, wobei die Zahl der Asylbewerber differenziert berücksichtigt werden muß) oder rund 65 Mio. Einwohner (Studie des Deutschen Instituts für Wirtschaftsforschung, DIW) hat. In internationalen und nationalen Verpflichtungen über die Höhe der Reduktionsziele muß diesem Umstand Rechnung getragen werden, zum Beispiel dadurch, daß innerhalb der Kriterien (vgl. Abschnitt A, 3. Kap., Nr. 2.2 und Abschnitt F), die der Festlegung der Reduktionsziele zugrundegelegt werden, den Pro-Kopf-Angaben entsprechende Bedeutung beigemessen wird.

Das Erreichen der Reduktionsziele erfordert schnelles und tiefgreifendes Handeln in allen Bereichen. Auf den Ergebnissen des Studienprogramms aufbauend, sieht die Kommission eine Vielzahl von Handlungsmöglichkeiten und Instrumenten, was unter anderem in den drei verschiedenen Reduktionsszenarien zum Ausdruck kommt. Es existieren verschiedene Wege, um durch unterschiedliche Kombinationen der Maßnahmen die Reduktionspotentiale der energiebedingten klimarelevanten Emissionen in der geforderten Höhe auszuschöpfen.

Die Kommission empfiehlt im folgenden einen Handlungsrahmen, der einerseits zur Erfüllung der Reduktionsziele geeignet ist, und der andererseits den unterschiedlichen Gewichtungen der in den einzelnen Bereichen zu ergreifenden Maßnahmen Rechnung trägt. Dieses Vorgehen gewährleistet, daß die Empfehlungen von allen Kommissionsmitgliedern einvernehmlich getragen werden können. Es trägt darüber hinaus der geänderten Situation durch den Beitritt der DDR Rechnung. Wegen der anderen Energieträgerstruktur und anderer Ausgangsbedingungen im Gebiet der ehemaligen DDR ist es erforderlich, die Zusammensetzung der Reduktionsbeiträge in den einzelnen Energiesektoren und -bereichen auf der Basis einer fundierten Datengrundlage anzupassen.

## 2.2 Strategie zum Erreichen der Reduktionsziele:

Die von rund 50 Instituten in rund 150 Studien für die Enquete-Kommission im Hinblick auf die Bundesrepublik Deutschland (ohne ehemalige DDR) erarbeite-

ten Aussagen über Wege zum Erreichen der Reduktionsziele konnten in der Kürze der zur Verfügung stehenden Zeit im Hinblick auf die im einzelnen zu ergreifenden Maßnahmen auch nicht annähernd im Detail ausgewertet und im Lichte des Beitritts der DDR überarbeitet werden.

Die Enquete-Kommission ersucht daher den Deutschen Bundestag und die Bundesregierung, in der nächsten Wahlperiode eine Strategie zur Reduktion der energiebedingten klimarelevanten Spurengasemissionen auf der Basis fundierter Daten in bezug auf die ehemalige DDR an die Sachlage nach dem Beitritt der DDR im einzelnen anzupassen und die einzuleitenden Maßnahmen weiter zu konkretisieren.

Nach einer ersten Auswertung der Studien der Enquete-Kommission zur Verminderung der CO<sub>2</sub>-Emissionen um 30 Prozent gegenüber dem Jahr 1987, sowie zur Reduktion der energiebedingten Emissionen von Methan um 30 Prozent, Stickoxiden um 50 Prozent, Kohlenmonoxid um 60 Prozent und von flüchtigen organischen Verbindungen (ohne Methan) um 80 Prozent für die Bundesrepublik Deutschland empfiehlt die Kommission, den gesetzlichen Rahmen zu überprüfen, gegebenenfalls anzupassen und geeignete Maßnahmen in die Wege zu leiten, damit die Reduktionsziele erreicht werden können.

Die Kommission empfiehlt, daß seitens der Bundesregierung bereits auf der Basis der gegenwärtigen Rechtslage weitreichende Sofortmaßnahmen in die Wege geleitet werden, die geeignet sind, in erheblichem Umfang einen Beitrag zur Erreichung der angestrebten Reduktionsziele, insbesondere auch der ins Auge zu fassenden Zwischenschritte, zu leisten.

Darüber hinaus wird die Bundesregierung ersucht, in den Bereichen, in denen auf der Basis der gegenwärtigen Gesetzeslage durch die Änderung bestehender Verordnungen erhebliche Beiträge auf dem Weg zu den vorgegebenen Reduktionszielen erzielt werden können, bis zum 1. September 1991 entsprechende Novellierungsentwürfe vorzulegen.

Darüber hinaus wird die Bundesregierung ersucht, dem Deutschen Bundestag bis zum 1. Dezember 1991 einen Bericht darüber zuzuleiten, welche Gesetzesänderungen notwendig sind, um den Handlungsrahmen dafür zu eröffnen, die angestrebten Reduktionsziele zu erreichen, und bis zum 1. Juli 1992 dem Deutschen Bundestag entsprechende Gesetzesentwürfe zuzuleiten.

Die erforderliche Energie-, Umwelt- und Verkehrssetzung muß in einem dynamischen Prozeß auf der Basis eines differenzierten Maßnahmenbündels regelmäßig überprüft und den Erfordernissen angepaßt werden. Im Hinblick auf die angestrebten Reduktionsziele und die im folgenden genannten Grundsätze und Prioritäten sind dem Deutschen Bundestag alle zwei Jahre — beginnend mit dem 1. Dezember 1993 — Fortschrittsberichte vorzulegen.

Die in diesem Zusammenhang relevanten Gesetze, Verordnungen und Vorschriften der Energie-, Umwelt- und Verkehrspolitik sind im Hinblick auf die Erreichung der Reduktionsziele zu überprüfen, gegebenenfalls den genannten Erfordernissen anzupassen

und um weitere geeignete Gesetze und ordnungspolitische Regelungen zu erweitern.

Dies betrifft zum Beispiel folgende Gesetze: das Energiewirtschaftsgesetz, das Energieeinspargesetz (EnEG), das Bundesimmissionsschutzgesetz (BImSchG), das 3. Verstromungsgesetz, das Sozialwohnungsbaugesetz, das Abfallgesetz, das Gemeindeverkehrsfinanzierungsgesetz und andere.

Ferner sind unter anderem folgende Verordnungen und Vorschriften betroffen: die Wärmeschutzverordnung (WSchVO), die Bundestarifordnungen für Elektrizität und Gas, die Abwärmenutzungsverordnung, die Heizungsanlagenverordnung, die Verordnungen für Groß- und Kleinf Feuerungsanlagen sowie die TA-Luft und andere.

Dabei ist zu berücksichtigen, daß die Änderungen sowohl die Energieanbieter als auch die Energienutzer betreffen müssen. Die Energie-, Umwelt- und Verkehrsgesetzgebung und die Maßnahmenstruktur müssen diesem Umstand durch eine differenzierte und vielschichtige Ausgestaltung ordnungspolitisch, fiskalisch und preispolitisch entsprechen.

Die Kommission ist zu dem Ergebnis gelangt, daß ein Mischkonzept von Abgabenlösungen, Anreizsystemen und sektorspezifischen Maßnahmenbündeln erforderlich ist, um die Reduktionsziele zu erreichen.

Die Kommission empfiehlt daher, zur Umsetzung der erforderlichen Maßnahmen ein entsprechendes Mischkonzept zu entwerfen, das die Elemente einer Abgabenlösung (Sonderabgaben oder Steuern) auf nationaler Ebene – soweit dies im Rahmen der EG möglich ist – beziehungsweise auf europäischer Ebene mit Anreizsystemen und mit sektorspezifischen Maßnahmenbündeln verknüpft. Hierbei sollte das Mittelaufkommen aus den Abgaben schwerpunktmäßig für die Förderung der rationellen Energienutzung und -umwandlung (einschließlich der Kraft-Wärme-Kopplung) und die Nutzung erneuerbarer Energiequellen sowie für die im Rahmen einer internationalen Konvention entstehenden Zahlungsverpflichtungen verwendet werden.

Die Kommission ersucht die Bundesregierung, bis zum 1. Dezember 1991 einen Plan vorzulegen, der ein abgestimmtes Konzept von finanzpolitischen Maßnahmen für alle Energiesektoren im Hinblick auf das Erreichen der von der Kommission genannten Reduktionsziele bis zum Jahr 2005 enthält.

Die Kommission ersucht den Deutschen Bundestag und die Bundesregierung, geeignete Schritte zur Beseitigung derjenigen rechtlichen, institutionellen und strukturellen Hemmnisse zu unternehmen, die einzelwirtschaftlich rentablen Maßnahmen zur Emissionsminderung entgegenstehen. Hierbei ist auf Basis der von der Enquete-Kommission vorgenommenen Hemmnisanalyse ein Maßnahmenbündel zu konzipieren, das sich besonders auch auf den Gebieten der Informationsverbesserung und der Fort- und Weiterbildung sowie der Verbesserung der Kostenorientiertheit bei der Preisbildung leitungsgebundener Energieträger gegenseitig verstärkt.

In diesem Zusammenhang begrüßt es die Enquete-Kommission, daß der Bundesminister für Bildung und

Wissenschaft eine breit angelegte Untersuchung zur Umsetzung der Empfehlungen der Kommission in das Bildungssystem unter Einbeziehung aller Bildungsbereiche – der allgemeinbildenden Schulen, der beruflichen Bildung, der Hochschulen und der Weiterbildung – durchgeführt hat. Die Kommission empfiehlt, auf der Basis der Ergebnisse dieser Studie zur Erreichung dieser Zielsetzung 1991 konkrete Maßnahmen zu ergreifen, diese Maßnahmen im Zusammenhang mit weiteren Untersuchungen zu konkretisieren und dem Deutschen Bundestag bis zum 1. Dezember 1993 über die Ergebnisse zu berichten, und verweist in diesem Zusammenhang auch auf den Bericht der Enquete-Kommission „Zukünftige Bildungspolitik – Bildung 2000“.

Die Kommission empfiehlt den möglichst schnellen Ausbau beziehungsweise Aufbau von Institutionen, wie beispielsweise Energiesparagenturen mit einer Reihe regionaler Büros, die auf Bundes-, Länder- sowie regionaler und lokaler Ebene über die Möglichkeiten der Emissionsreduktion, der rationellen Energienutzung, energiebewußtes Verhalten und den Einsatz erneuerbarer Energien beraten sollen.

Diesen Institutionen wird eine Reihe von Aufgaben übertragen, die im wesentlichen katalytische Funktionen haben, um potentielle Investoren zu aktivieren und bestehende Organisationen (Kammern, Beratungsbüros etc.) zu unterstützen. Zu den Aufgaben gehören zum Beispiel: Verbesserung von Fortbildung, Information, Beratung, Motivation, Ansprache der verschiedenen Zielgruppen (Privatpersonen, öffentliche Einrichtungen, Gebietskörperschaften (Kreise, Kommunen etc.), Verbände, Träger von Fort- und Weiterbildung, Handwerk, Klein- sowie Mittel-Industrie etc.) sowie eine Intensivierung der Verbundforschung, insbesondere in der mittelständischen Wirtschaft. Diese Institutionen, zum Beispiel die Energiesparagenturen, sollen auch darauf hinwirken, daß regionale und lokale Energiekonzepte auf die Klimaproblematik ausgerichtet werden. Die Bundesregierung wird ersucht, dem Deutschen Bundestag bis zum 1. Dezember 1991 ein konkretes Konzept für die Einrichtung solcher Institutionen vorzulegen.

## **2.3 Grundsätze und Prioritäten bei den Maßnahmen bezüglich der Energieträgerstruktur**

Im Hinblick auf die rationellere Energieverwendung und Energieeinsparung, die erneuerbaren Energien, die fossilen Energieträger und die Kernenergie sollen Einzelmaßnahmen, Maßnahmenprogramme sowie die Energie-, Umwelt- und Verkehrsgesetzgebung folgenden Grundsätzen und Prioritäten genügen:

### **2.3.1 Energieeinsparung, verbesserte Energieeffizienz, rationellere Energieverwendung**

Energieeinsparung durch rationellere Energienutzung und -umwandlung sowie durch energiebewußtes Verhalten haben Priorität beim Erreichen der gesteckten Reduktionsziele. Energieeinsparung und

Verbesserung der Energieeffizienz werden hier, dem Stand der Diskussion entsprechend, grundsätzlich im Sinne des Energiedienstleistungskonzeptes verstanden. Das heißt, der sogenannte Energiebedarf ist auf eine Dienstleistung (zum Beispiel Raumtemperatur, Beleuchtung, Transport) gerichtet, die durch eine Kombination der Faktoren Energie, Kapital und technisches Wissen erbracht wird. Energieeinsparung wird hier als Oberbegriff verstanden: Er umfaßt sowohl die Minimierung des Energieeinsatzes für ein gegebenes Niveau von Energiedienstleistungen über die gesamte Prozeßkette – also einschließlich der Umwandlung von Primärenergie in Endenergie und deren Umwandlung in Nutzenergie beziehungsweise in die eigentliche Energiedienstleistung – als auch die Reduktion von Energiedienstleistungen. Aufmerksamkeit verdienen dabei sowohl die Angebots- als auch die Nachfrageseite.

In der Bundesrepublik Deutschland betrug im Jahr 1987 das Verhältnis von Primärenergie, Endenergie und Nutzenergie etwa 3 zu 2 zu 1; das heißt, nur etwa ein Drittel der Primärenergie beziehungsweise rund 45 Prozent der Endenergie wurden in Nutzenergie umgesetzt. Die eingesetzte Primärenergie bestimmt aber die Höhe der Emissionen. Die Industrie setzt rund 54 Prozent der Endenergie, die sie verbrauchte, in Nutzenergie um, der Verkehr rund 17 Prozent, die Haushalte rund 58 Prozent und die Kleinverbraucher (Gewerbebetriebe, öffentliche Einrichtungen und andere) rund 48 Prozent.

Die Maßnahmen zur rationelleren Energieverwendung sollten daher eine möglichst weitgehende Ausschöpfung der technischen Potentiale anstreben, da sie die notwendige Voraussetzung dafür schaffen, daß trotz eines zukünftigen Wirtschaftswachstums der Energieeinsatz und die Emissionen nicht steigen, sondern erheblich reduziert werden.

Das in den Studien ermittelte technische CO<sub>2</sub>-Verminderungspotential (vgl. 4. Kapitel) beträgt derzeit

- beim Gebäudebestand 70 bis 90 Prozent,
- bei den Neubauten 70 bis 80 Prozent,
- im Sektor Kleinverbrauch 40 bis 70 Prozent,
- bei den Elektrogeräten 30 bis 70 Prozent,
- bei den PKW und Flugzeugen 50 bis 60 Prozent,
- bei der Warmwasserbereitung 10 bis 50 Prozent,
- bei Bussen, LKW, Brennstoffen in der Industrie, Kraftwerken und Raffinerien 15 bis 25 Prozent,
- bei der Kraft-Wärme-Kopplung und beim Strom in der Industrie 10 bis 15 Prozent.

Insgesamt ergibt sich bei dem derzeitigen Stand der Technik ein technisches CO<sub>2</sub>-Verminderungspotential in der Größenordnung von 35 bis 45 Prozent allein durch Maßnahmen der rationelleren Energieverwendung. Das technische Potential, das durch weitere Innovationen in Zukunft noch größer zu werden verspricht, weist ausdrücklich auf die Bedeutung möglichst großer Anstrengungen zur rationellen Energieverwendung hin. Das technische Potential ist allerdings nicht gleichzusetzen mit dem – geringeren – Potential, das aufgrund der Kosten, der Rahmenbe-

dingungen, der Hemmnisse etc. bis zum Jahr 2005 ausgeschöpft werden kann.

Hinzu kommen ferner weitere Reduktionsmöglichkeiten, deren Emissions-Reduktionspotentiale im Studienprogramm nicht explizit ermittelt worden sind, wie zum Beispiel verbesserte interne und externe Wärmenutzung, abfallwirtschaftliche Maßnahmen zur Vermeidung und stofflichen Verwertung sowie systemoptimierende Strategien.

Insgesamt kommt die Kommission zu dem Ergebnis, daß ein CO<sub>2</sub>-Reduktions-Potential in der Größenordnung von mindestens 20 Prozent (addierbar zu weiteren Potentialen) bis zum Jahr 2005 durch Erhöhung der Energieeffizienz, rationelle Energieverwendung und energiebewußtes Verhalten erreicht werden kann.

Die Kommission geht davon aus, daß durch Energieeinsparung aufgrund von energiebewußtem Verhalten beziehungsweise der Reduktion von Energiedienstleistungen (zum Beispiel das Senken der Raumtemperatur von 22 auf 20 °C, die Wahl geeigneter Verkehrsmittel, soweit dies möglich ist, Recycling und anderes) ein CO<sub>2</sub>-Verminderungspotential von 5 bis 15 Prozent vorhanden ist. Sie ging bei der Ermittlung des 30-Prozent-Ziels von einer Reduktion in der Größenordnung von 5 Prozent durch energiebewußtes Verhalten bei allen drei Reduktionsszenarien aus, die addierbar zu den anderen Reduktionspotentialen ist.

### 2.3.2 Erneuerbare Energien

Maßnahmen zur verstärkten Nutzung der erneuerbaren Energien haben – insbesondere im Sinne energiepolitischer Langfristperspektiven – ebenfalls Priorität. Auch wenn ihr Einsatz trotz großer Anstrengungen bis zum Jahr 2005 zunächst nur einen begrenzten Beitrag an den Reduktionen erbringen wird, geht die Kommission davon aus, daß diese Anstrengungen schon jetzt unternommen werden müssen, um dadurch erst die Voraussetzung dafür zu schaffen, daß die Nutzung der erneuerbaren Energien im Zeitraum nach 2005 wesentlich größere Anteile an der Energieversorgung und an den Reduktionszielen erlangen kann.

Bei der Nutzung der erneuerbaren Energien in größerem Umfang muß beachtet werden, daß sie gegenüber den Potentialen der rationelleren Energieverwendung zum Teil zeitversetzt zur Wirkung kommen. Unter der Zielvorgabe, daß bis zum Jahr 2050 weltweit eine Reduktion um etwa 50 Prozent erzielt werden muß, müssen die Potentiale der regenerativen Energien so weit wie möglich ausgeschöpft werden. Nach den Ergebnissen der für die Kommission erarbeiteten Studien können diese Potentiale von 2005 bis 2050 in etwa derselben Größenordnung liegen wie die der rationelleren Energieverwendung.

Damit die erneuerbaren Energien in ein bis zwei Jahrzehnten größere Beiträge leisten können, ist sicherzustellen, daß bereits heute nach einer gestaffelten Strategie sowohl die Erschließung des Marktes für einen Teil der erneuerbaren Energien als auch die Erforschung und Entwicklung eines anderen Teils der re-



generativen Energietechniken und -systeme erheblich intensiviert werden.

Kleine und mittlere Windenergiekonverter, Wasserkraftanlagen, Biogasanlagen zur Fermentierung von landwirtschaftlichen Abfällen, Deponie- und Klärgas, solare Niedertemperaturanlagen und anderes können bereits heute in Serie produziert werden und schon kurzfristig zwar begrenzte, jedoch nicht zu vernachlässigende Marktanteile erreichen. Hier sind Maßnahmen zur Markterschließung entscheidend, wobei ein gewisser Forschungs- und Entwicklungs-Einsatz hilfreich sein kann, aber nicht entscheidend ist. Diese Techniken können im wesentlichen die erschließbaren Potentiale bis 2005 liefern.

Große Windenergieanlagen benötigen noch etwa ein Jahrzehnt Forschungs- und Entwicklungs-Arbeit, bis sie in größerem Umfang marktfähig sind. Allerdings stellen sich dabei — im Gegensatz zu kleinen und mittleren Anlagen — verstärkt Fragen nach dem Landschaftsbild, dem Geräuschpegel und demzufolge der Akzeptanz.

Anlagen zur Herstellung und Nutzung der Photovoltaik sowie Solarwasserstoff-Systeme benötigen eine Anlaufzeit von mehreren Jahrzehnten, bevor sie einen wesentlichen Anteil an der Energieversorgung ausmachen können. Ein paralleles Vorgehen von Markterschließung und Forschungs- und Entwicklungsarbeit ist hier besonders bedeutsam, wobei mit geeigneten Maßnahmen zur erhöhten Produktion und zum Einsatz von Photovoltaikanlagen unverzüglich begonnen werden muß (vgl. in diesem Zusammenhang auch den Bericht der Enquete-Kommission „Technikfolgen-Abschätzung und -Bewertung“ des Deutschen Bundestages).

Das Studienprogramm der Kommission hat sich auf die Nutzung der erneuerbaren Energien in der Bundesrepublik Deutschland beschränkt. Wegen der Möglichkeit von Energieimporten auf der Basis regenerativer Energiequellen einerseits und der Exportchancen für solartechnische Anlagen andererseits ist es daher darüber hinaus bedeutsam, die erneuerbaren Energien im weltweiten Kontext zu sehen:

Die Sonnenenergie ist mit weitem Abstand die größte Energiequelle, zumal sie über den natürlichen Treibhauseffekt überhaupt erst ein für das Leben auf der Erdoberfläche geeignet hohes und ausgeglichenes Temperaturniveau schafft.

Der jährliche Primärenergieverbrauch der Menschheit, im Jahr 1987 rund  $90 \times 10^{12}$  Kilowattstunden (rund 330 Exajoule beziehungsweise 11 Milliarden Tonnen Steinkohleeinheiten), beträgt nur etwa ein Zehntausendstel der auf die Erdoberfläche jährlich einfallenden Sonnenstrahlung. Der Anteil der Landfläche an der Erdoberfläche beträgt etwa 30 Prozent, so daß die jährlich auf die Landfläche der Erde einfallende Sonnenstrahlung etwa das Dreitausendfache des derzeitigen Primärenergieverbrauchs der Welt beträgt.

Im Prinzip ist daher ein großes technisches Potential zur direkten und indirekten Nutzung von Solarenergie vorhanden: Würde man langfristig wenige Prozent der Landfläche der Erde, das heißt einige Millionen Quadratkilometer, für eine Energieumwandlung der

Solarstrahlung mit einem Gesamtwirkungsgrad von durchschnittlich fünf Prozent (einschließlich aller Umwandlungs-, Verteilungs- und Speicherverluste) und zusätzlich einen Teil des technisch nutzbaren Potentials der Wasser- und Windkraft nutzen, so ließe sich das Zwei- bis Dreifache des heutigen globalen Primärenergiebedarfs mit regenerativen Energien decken. Dies bedeutet unter anderem, daß im Rahmen der weltweit notwendigen Strategien hier mit der Erschließung von besonders großen Potentials und über Jahrzehnte hinweg mit großen Exportchancen zu rechnen ist, was für die nationale Strategie und die hier ansässige Wirtschaft von besonders großer Bedeutung ist.

Die Kommission empfiehlt nachdrücklich, die Nutzung der erneuerbaren Energien intensiv zu fördern. Dies betrifft unter anderem auch eine angemessene hohe Vergütung für regenerativ erzeugte Elektrizität sowie darüber hinaus weitergehende Förder- und Anreizprogramme.

### 2.3.3 Fossile Energieträger

Die fossilen Energieträger Erdgas, Erdöl und Kohle müssen so umweltfreundlich und insbesondere so klimaverträglich wie möglich genutzt werden. Ihre Nutzung muß so erfolgen, daß sie zu deutlichen Emissionsminderungen führt, wobei alle Maßnahmen im Hinblick auf den zukünftig zu erwartenden Wandel ein größtmögliches Maß an Flexibilität und Reversibilität aufweisen müssen.

Eine höhere Energieeffizienz bei der Verbrennung der fossilen Energieträger kann insbesondere durch modernere und im Wirkungsgrad verbesserte Kraftwerke sowie durch einen erhöhten Einsatz von Kraft-Wärme-Kopplungs-Anlagen erreicht werden.

Erdgas ist aufgrund der geringeren spezifischen  $\text{CO}_2$ -Emission bei der Verbrennung im Vergleich zu Kohle und Erdöl geeignet, vorübergehend im größeren Umfang eingesetzt zu werden. Als limitierender Faktor muß dabei die mögliche Beschränkung der Importkapazität angesehen werden, die sich ergibt, wenn viele Staaten ihren Erdgaseinsatz erhöhen wollen, um den zusätzlichen Treibhauseffekt auf diese Weise einzudämmen. Die weltweiten Erdgasressourcen sind begrenzt, so daß eine verstärkte Nutzung des Erdgases nur als vorübergehende und mengenmäßig begrenzte Maßnahme zu sehen ist.

Die Kommission empfiehlt, den Erdölanteil an der Energieversorgung so schnell und so weit wie möglich zu reduzieren, zumal fast der gesamte Erdölbedarf importiert wird und Erdöl als Ausgangsstoff für den nichtenergetischen Verbrauch besonders geeignet ist. Eine Reduktion der Verbrennung von Mineralölprodukten betrifft insbesondere den Heizenergiebereich und den motorisierten Verkehr.

Der Einsatz von Steinkohle und Braunkohle ist erheblich zu reduzieren. Da sowohl Steinkohle als auch Braunkohle zu den heimischen Ressourcen gehören, die in größerem Umfang verfügbar sind, sind mit einem Rückgang des Einsatzes der Kohle arbeitsmarkt- und sozialpolitische Anpassungsprozesse von erheblicher

chem Umfang verbunden. Die Kommission empfiehlt deshalb der Bundesregierung und den Ländern, in bezug auf die weitere Nutzung der Kohle intensive Untersuchungen unter Beachtung aller Aspekte durchzuführen. Dabei muß besonders der Aspekt berücksichtigt werden, daß der Anteil der Braunkohle an der Energieversorgung der DDR im Jahr 1987 rund 70 Prozent betrug und daß eine Strategie der zukünftig zu fördernden Braunkohlenmenge unter Berücksichtigung der neuen Energiesituation der Bundesrepublik Deutschland nach dem Beitritt der DDR entwickelt werden muß.

Die Kommission empfiehlt ferner Maßnahmen zur Verminderung der Methanemissionen, die bei der Förderung von Steinkohle (Grubengas) und Erdöl sowie bei der Förderung, dem Transport und der Verteilung von Erdgas entstehen.

### 2.3.4 Kernenergie

Über die Frage, ob und wie weit die Kernenergie weiter genutzt werden soll, gehen die Meinungen der Kommissionsmitglieder stark auseinander.

a) Ein Teil der Mitglieder der Kommission vertritt die folgende Auffassung:

„Ob Kernenergie in Deutschland friedlich genutzt werden soll oder nicht, kann nicht losgelöst vom internationalen Kontext beurteilt werden. Diese Energie trägt zur weltweiten Energieversorgung mit 5 Prozent und zur weltweiten Stromversorgung mit 15 Prozent bei. In diesem Rahmen leistet sie bereits einen signifikanten Beitrag zur Erhaltung und Verbesserung des Klimas.“

Auch in Zukunft wird jedes Land selbstverantwortlich entscheiden, ob es Kernenergie für friedliche Zwecke einsetzt oder nicht. Jedenfalls schließen diese Mitglieder aus, daß ein weltweiter Konsens auf Verzicht der Nutzung dieser Energie zustandekommt — etwa mit der Vorgabe, allein durch rationellere Energieverwendung und durch Einsatz von Erneuerbaren den schon wegen der Bevölkerungsexplosion steigenden Weltenergiebedarf zu decken. Hierfür spricht auch die sich weltweit abzeichnende Neubewertung der Kernenergie. Dies hat beispielsweise dazu geführt, daß Länder, die bereits den Ausstieg aus dieser Energie verbindlich festgelegt haben, daran denken, diesen Beschluß zu widerrufen.

Es ist verantwortbar, die Kernenergie in Deutschland längerfristig zu nutzen, dies umso mehr, als die Sicherheit der Kernenergienutzung auch im Wege der Nachrüstung in Betrieb befindlicher Anlagen weiterhin verbessert wird. Sichere Leichtwasser- und Hochtemperaturreaktoren werden entwickelt.

In dieser Perspektive könnte Deutschland nicht nur zur Vermeidung klimaschädlicher Emissionen beitragen, sondern anderen Ländern auch Technologien zur Verfügung stellen und damit erreichen, daß die Kernenergie weltweit sicherer wird.

Die Enquete-Kommission hat in einem umfassenden, an etwa 50 Institute unterschiedlicher Aus-

richtung vergebenen Studienprogramm die Möglichkeiten einer Verringerung klimaschädlicher Emissionen untersucht. In der von den Studiennehmern akzeptierten zusammenfassenden Analyse wurden auch die Bedingungen und die Konsequenzen eines Verzichts der Bundesrepublik auf Kernenergie, sei es bis 2005, sei es bis 1995, geklärt. Diese Analyse zeigt, daß nur unter nicht vertretbaren Bedingungen und nicht zu verantwortenden Konsequenzen die CO<sub>2</sub>-Emissionen angemessen verringert und zugleich die Kernkraftwerke abgeschaltet werden können. Eine Reihe inzwischen eingetretener neuerer Entwicklungen wurde dabei noch nicht einmal berücksichtigt.

Einem Ausstieg Deutschlands aus der Kernenergie stehen darüber hinaus die folgenden Gründe entgegen:

- nach neueren Abschätzungen wird angenommen, daß die Bevölkerungszahl nicht — wie in den Studien zugrunde gelegt — abnehmen, sondern eher um mehrere Millionen zunehmen wird. Dies führte dann zu einem nicht in Rechnung gestellten Mehrverbrauch von Energie;
- die insbesondere nach Stilllegung aller Kernkraftwerke im Gebiet der DDR erwartete Lücke in der Stromversorgung wird nicht in Rechnung gestellt;
- ein Ausstieg erfordert aus Umweltschutzgründen, langzeitkonservierte Kohle- und Ölkraftwerke wieder in Betrieb zu nehmen;
- entgegen jeder Politik einer — zumal nach dem Irak-Konflikt gebotenen — Abkehr vom Öl müßte zusätzlich Heizöl in großen Mengen verstromt werden;
- es wäre — auch im Hinblick auf die internationale Situation — nicht möglich, kurz- und mittelfristig die Mengen an Erdgas aufzubringen, die zur Deckung des Strombedarfs dann erforderlich werden;
- angesichts des außerordentlichen Investitionsbedarfs zur Sanierung der Stromerzeugung im Gebiet der DDR wäre es kaum möglich, kurzfristig auch noch die Mittel aufzubringen, die zur Umstrukturierung des Kraftwerksparks bei einem Ausstieg erforderlich werden;
- es wird übersehen, daß es zu einem europäischen Binnenmarkt mit Freiverkehr für Energie einschließlich Strom kommen wird.

In dieser Lage sollten, sofern nicht sicherheitstechnische Bedenken entgegenstehen, die im Betrieb befindlichen Kernkraftwerke und deren Standorte erhalten bleiben (neue Standorte wären nicht erforderlich). Über einen Zubau sollte erst nach sorgfältiger Analyse der energie- und umweltpolitischen Erfordernisse entschieden werden: Strombedarfsentwicklung, Sicherstellung der Kohleförderung in einem klimaverträglichen Umfang, Verringerung der Emissionen, EG-Wettbewerbsfähigkeit des deutschen Stromangebots und Stromlieferungen in das Gebiet der DDR und osteuropäische Länder.“

- b) Ein anderer Teil der Mitglieder der Kommission vertritt die folgende Auffassung:

„Es ist weder sachlich gerechtfertigt noch nachzuvollziehen, die zukünftig möglichen Gefahren aus der Veränderung des Treibhauseffektes gegen die bekannten Risiken und Langzeitwirkungen der Atomenergie auszuspielen. Auch die vorliegenden Studien belegen, daß eine wirksame Politik zum Schutz der Erdatmosphäre und der Ausstieg aus der Atomenergie vereinbar sind. Der Interpretation der Studien durch die Befürworter der Kernenergie in der Kommission, ‚daß nur unter nicht vertretbaren Bedingungen und nicht zu verantwortenden Konsequenzen die CO<sub>2</sub>-Emissionen angemessen verringert und zugleich die Kernkraftwerke abgeschaltet werden können‘, wird deshalb nachdrücklich widersprochen. Notwendig – und bei einer entsprechend angelegten politischen Gestaltungsstrategie auch möglich – ist eine Industrie- und Energiepolitik, die beide Risiken Treibhauseffekt und radioaktive Verseuchung gleichzeitig verringert beziehungsweise beseitigt. Auch die großen Gefahren für das Weltklima dürfen Tschernobyl nicht vergessen lassen. Insofern ist es die politische Aufgabe, eine insgesamt risikominimierende und umweltverträgliche Strategie zu entwickeln und durchzusetzen.“

Von diesem Teil der Enquete-Kommission wird die Atomenergie aber nicht nur wegen ihrer unververtretbaren Risiken abgelehnt, sondern auch aufgrund ihrer spezifischen energiewirtschaftlichen, organisatorischen und technologischen Zwänge und Strukturwirkungen für das gesamte System der Energieversorgung. Denn es ist real nicht möglich, lediglich kohlenstoffhaltige Energieträger durch die angeblich ‚kohlenstofffreie Atomenergie‘ auszutauschen und mit den ermittelten Einsparpotenzialen zu kombinieren. Vielmehr müssen die systemaren Zusammenhänge jeweiliger Technologien und Systeme beachtet werden, ob sie zum Beispiel die effizientere Energienutzung, Kraft-Wärme-Koppelung oder Techniken auf der Basis regenerativer Energieträger fördern oder blockieren.

Bereits die bisherige Konzentration von Kapital, Know-how und Forschungsmitteln auf den Ausbau der Atomenergie hat die Entwicklung umweltverträglicherer und ökonomisch sinnvoller Alternativen gehemmt. Diese empirisch belegbare Aussage widerspricht der Behauptung, daß die Atomenergie einen wesentlichen Beitrag zur Klimastabilisierung geleistet habe und zukünftig noch stärker leisten könne.

Für den kurzen, aber entscheidenden Zeitraum notwendiger Maßnahmen zum Schutz der Erdatmosphäre bis zum Jahr 2005 blockiert gerade die Großtechnologie Atomenergie mit ihren betriebswirtschaftlichen Verwertungszwängen und ihrer geringen Effizienz den schnellen Umbau zu einer energieeffizienteren Gesellschaft. Der von der Enquete-Kommission geforderte Vorrang für die rationelle Energieverwendung ist auf diesem Weg nicht zu verwirklichen.

Eine auch international beispielgebende Energiepolitik ist notwendig, um das heutige System der Energieversorgung grundlegend zu reformieren. Dies schließt auch eine internationale Zusammenarbeit zur Verringerung der atomaren Risiken mit ein.“

Die Kommission verweist hierzu auf die Behandlung des Themas in den folgenden Kapiteln des Abschnittes E und empfiehlt, diesen Themenkomplex in einem sachlichen und diskursiven Verfahren weiter zu beraten.

## 2.4 Sektorspezifische Maßnahmen und Programme

Im Rahmen der von der Bundesregierung einzuleitenden Maßnahmen sowie der Überprüfung des zur Verfügung stehenden und an die Problemlage anzupassenden rechtlichen Instrumentariums empfiehlt die Kommission die Beachtung folgender sektorspezifischer Schwerpunkte:

### 2.4.1 Heizwärmebereich in allen Sektoren

Im Heizwärmebereich können gemäß dem Stand der Technik besonders hohe Reduktionen des Energieeinsatzes und der Spurengasemissionen erzielt werden. Die Kommission hält es für erforderlich, hier besonders große Anstrengungen zu unternehmen. Sie empfiehlt aufgrund der Ergebnisse des Studienprogramms, die CO<sub>2</sub>-Emissionen des Heizenergieeinsatzes in allen Endenergiesektoren bis zum Jahr 2005 um bis zu 40 Prozent zu vermindern.

Die Kommission hält aufgrund der Ergebnisse der für sie durchgeführten Studien besonders folgende Maßnahmen für erforderlich:

- Novellierung der Wärmeschutzverordnung aus dem Jahr 1982 mit dem Ziel, daß diese sich für den Zubau an Niedrigenergiehaus-Standards orientieren und nach einer zeitlich gestaffelten Strategie auch für den Baubestand gelten soll; ihr allgemeiner Geltungsbereich sollte sich auf alle Endenergiesektoren erstrecken;
- Schaffung spezieller Anreiz-, Finanzierungs- und Förderungsprogramme, insbesondere auch im Mietwohnungsbereich, auch für Beratung und berufliche Fortbildung, zur energetischen Optimierung von Neubauten sowie des Baubestandes und dessen stufenweiser Anpassung an die erhöhten Wärmedämmstandards der im obigen Sinne zu novellierenden Wärmeschutzverordnung;
- Schaffung zusätzlicher Anreiz-, Finanzierungs- und Förderungsprogramme für bauliche Maßnahmen, insbesondere auch im Mietwohnungsbereich, auf dem Gebiet der bisherigen DDR, um die Anforderungen der zu novellierenden Wärmeschutzverordnung auch dort erfüllen zu können.

Die Bausubstanz auf dem Gebiet der ehemaligen DDR befindet sich in einem wesentlich schlechterem Zustand als die auf dem Gebiet der Bundesrepublik Deutschland vor dem Beitritt der DDR. Deshalb ist es besonders wichtig, daß alle baulichen

- Maßnahmen, die in den kommenden Jahren dort erfolgen, den Anforderungen der zu verschärfenden Wärmeschutzverordnung genügen. Würde dies unterlassen, wäre eine der größten Chancen zur Ausschöpfung von Reduktionspotentialen verpaßt, da Renovierungen von Gebäuden in der Regel in einem Zeitabstand von mehreren Jahrzehnten erfolgen;
- Einführung von Energiekennzahlen für alle Gebäude zur Erhöhung der Markttransparenz und Vergleichbarkeit des energetischen Zustandes von Gebäuden;
  - besondere Förderung der passiven und aktiven Solarenergienutzung zur Verminderung des Wärmebedarfs sowie zur dezentralen Nutzung der Solarenergie, insbesondere auf Dächern;
  - deutliche Steigerung des Nahwärme/Fernwärme-Anteils an der Wärmeversorgung auf der Basis von Kraft-Wärme-gekoppelten Anlagen;
  - öffentliche Wohnungsbaumodernisierungsprogramme (ggf. gekoppelt mit Mietpreisbindung) mit dem Schwerpunkt der Energieeinsparung und Emissionsminderung;
  - Neufassung der Heizungsanlagenverordnung und der Kleinf Feuerungsanlagenverordnung mit dem Ziel einer möglichst weitreichenden Reduktion der Schadstoffemissionen und der Beschränkung von Ausnahmeregelungen auf das geringstmögliche Maß;
  - Überarbeitung der technischen Normen im nationalen und EG-weiten Rahmen gemäß dem Stand der Technik mit Blick auf Energieeinsparung und ökologische Kriterien, insbesondere im Heizungs- und Baubereich;
  - umfassende Information, Beratung und Motivationsbildung über die Notwendigkeit von Maßnahmen zur Verminderung des Heizwärmeeinsatzes, die Möglichkeiten von Anreiz-, Finanzierungs- und Förderprogrammen und die Bedeutung energiebewußten Nutzerverhaltens in privaten, öffentlichen und kommerziell genutzten Gebäuden; Ausbau und Neueinrichtung von Energieberatungsstellen, die flächendeckend, auch vor Ort, unabhängige Beratungen vornehmen;
  - unverzügliche Anpassung der Lehrinhalte in Bildung und Ausbildung sowie Fort- und Weiterbildung, insbesondere bei Architekten, Planern, Ingenieuren, im Bau- und Heizungsgewerbe, der Bauindustrie und in der Erwachsenenbildung;
  - Berücksichtigung der zur Energieeinsparung und Emissionsminderung im gebotenen Umfang notwendigen Gegebenheiten bei allen regionalen und kommunalen, mit dem Baubereich befaßten Behörden (Bauleitpläne etc.);
  - Abstimmung der Modernisierung von Heizungsanlagen mit Maßnahmen des Wärmeschutzes, der Wärmedämmung und der passiven und aktiven Solarenergienutzung; Beratung zur Optimierung des Heizwärmesystems inklusive der kontrollierten Lüftung;
- Einleitung von Maßnahmen, die sicherstellen, daß der Heizenergieeinsatz, über die gesamte Energiekette berechnet, minimiert wird mit dem Ziel der Reduktion der Emissionen von klimarelevanten Spurengasen.

#### 2.4.2 Verkehrssektor

Um die im Verkehrssektor im Trendfall zu erwartenden Emissionszuwächse<sup>1)</sup> abzufangen und darüber hinaus in Zukunft die Emissionen zu reduzieren, bedarf es einer umfassenden konzeptionellen Fortentwicklung des Verkehrsbereichs sowie einer Modernisierung der Verkehrstechnik mit abgestimmten fahrzeugtechnischen und verkehrsbeeinflussenden Maßnahmen.

Auf der Grundlage der Studien der Enquete-Kommission können Emissionsminderungspotentiale gemäß der zu erwartenden Entwicklung im Personen- wie im Güterverkehr insbesondere auf folgende Weise erreicht werden:

- Verkehrsvermeidung,
- Verminderung der zu erwartenden Verkehrsleistungen im Straßen- und Flugverkehr,
- Verlagerung von Verkehrsleistungen auf energieeffektivere und emissionsärmere Verkehrsmittel,
- umweltverträgliche Verkehrsabwicklung und Verbesserung der Verkehrsauslastung,
- technische Energieeinsparung an Verkehrsmitteln (bei Herstellung und Gebrauch) sowie technische Maßnahmen zur Emissionsminderung und Schadstoffrückhaltung,
- Verhaltensänderungen.

Die Kommission weist ausdrücklich darauf hin, daß Maßnahmen zur Begrenzung des Verkehrs, insbesondere des Straßenverkehrswachstums, zugleich positive Auswirkungen auf die Emissionen von Stickoxiden, Kohlenmonoxid, flüchtigen organischen Verbindungen (ohne Methan) und Lärm haben sowie die sozialen und ökologischen Folgeschäden des Verkehrs (Auswirkungen auf die Gesundheit, auf Böden und Vegetation, Unfälle, Flächenverbrauch etc.) reduzieren.

Die Enquete-Kommission ersucht die Bundesregierung, aufbauend auf ihrem Studienprogramm bis zum 1. Dezember 1991 ein abgestimmtes Konzept für fahrzeugtechnische und verkehrsbeeinflussende Maßnahmen vorzulegen.

Die Kommission empfiehlt, im Verkehrssektor die Emissionsminderungspotentiale weitestgehend auszuschöpfen. Weiterhin sollen im Rahmen der zu er-

<sup>1)</sup> Bis zum Jahr 2005 ist, bezogen auf das Jahr 1987, im Trendfall, das heißt ohne spezifische Maßnahmen zur Reduktion der Treibhausgase, mit einer Erhöhung der CO<sub>2</sub>-Emissionen im Personen- und Güterverkehr um 21 bis 28 Prozent (je nach Basis der angenommenen Wohnbevölkerung) für das Gebiet der Bundesrepublik Deutschland (ohne ehemalige DDR) zu rechnen. Durch den Beitritt der DDR würden ohne spezifischen Maßnahmen die Schadstoffemissionen des Verkehrs noch erheblich stärker steigen.

stellenden energiepolitischen Gesamtkonzeptionen wirksame preispolitische Maßnahmen zur Minderung verkehrsbedingter Schadgase konkretisiert werden.

Die Kommission weist darauf hin, daß bei der Erstellung dieses Verkehrskonzeptes eine möglichst weitgehende Internalisierung externer Kosten der Verkehrssysteme nach dem Verursacherprinzip von besonderer Wichtigkeit ist. Dies ist besonders vor dem Hintergrund der zukünftigen Liberalisierung des europäischen Binnenmarktes von Bedeutung. Die Verteilungseffekte derartiger preispolitischer Maßnahmen müssen dabei berücksichtigt werden.

Es muß darauf hingearbeitet werden, daß sowohl im Personenverkehr als auch im Güterverkehr möglichst schnell die größtmögliche Ausschöpfung der technischen Einspar- und Rückhaltepotentiale in allen Verkehrssystemen in die Wege geleitet werden.

Dies betrifft insbesondere die Entwicklung emissions- und verbrauchsarmer Fahrzeuge und Flugzeuge sowie die Verbesserung der Kraftstoffqualitäten für den Straßen- und Flugverkehr. Im Hinblick auf die klimarelevanten Schadstoffemissionen empfiehlt die Kommission die umfassende Einführung des Abgaskatalysators (bundesweit und EG weit) für PKW und LKW sowie geeigneter Rückhalteeinrichtungen für Dieselfahrzeuge, um die Emissionen von Stickoxiden, Kohlenmonoxid, flüchtigen organischen Verbindungen (ohne Methan), Staub und Ruß so weit wie möglich zu beschränken.

Die Kommission hält aufgrund der Ergebnisse der für sie durchgeführten Studien unter anderem Programme in folgenden Bereichen für notwendig:

#### Ordnungs- und Finanzpolitik:

- Schaffung und Erweiterung geeigneter ordnungsrechtlicher Instrumente, z. B.
  - Fortschreibung der Richtlinie 70/220 EWG zur Sicherstellung EG-weiter Grenzwerte bis 1992 nach dem neuesten Stand der Abgasreinigungstechnik;
  - Zulassungsvorschriften für Transportmittel zur Ausschöpfung technischer Einsparungs- und Rückhaltepotentiale (d. h. verschärfte Abgasvorschriften, besonders für LKW; Kraftstoffverbrauchsvorschriften; Geschwindigkeitsregler für LKW etc.);
  - Einschränkung des innerdeutschen Luftverkehrs durch Verlagerung auf die Schiene; dies gilt insbesondere für Flüge unterhalb 400 km, die in Konkurrenz zu bestehenden IC-Verbindungen stehen;
  - Verschärfung der Emissionsgrenzwerte für Flugzeuge;
  - Beschränkung der Standläufe von Flugzeugen;
  - Überprüfung der Möglichkeiten, Konzessionen im regionalen Flugverkehr einzuschränken;
  - Überprüfung der Möglichkeiten, Flüge in der Stratosphäre einzuschränken;

- Sonderregelungen, zum Beispiel für Fahrzeuge des öffentlichen Personennahverkehrs und emissionsarme Fahrzeuge;
- Verordnungen zum Abfallgesetz (Autoverschrottung).
- Förderrichtlinien, die eine ökologische Orientierung von Verkehrsplänen und Maßnahmen sicherstellen
  - Novellierung des Verkehrswegerechts;
  - Novellierung des Gemeindeverkehrsfinanzierungsgesetzes;
  - Entkoppelung der Finanzierung des Öffentlichen Personennahverkehrs (ÖPNV) von den Energieerlösen im Rahmen eines öffentlichen Finanzierungsprogramms zur Steigerung der Attraktivität des ÖPNV.
- Auf Bundes- und Landesebene verkehrsträgerspezifische Steuern oder Sonderabgaben
  - Aufhebung von Sondertarifen im regionalen Flugverkehr nach dem Beschluß des EG-Ministerrates vom Dezember 1987;
  - Umlegung der Flugsicherungskosten;
  - umweltgerechtere und stärker am Verursacherprinzip orientierte Besteuerung des KFZ-Verkehrs;
  - Verursachergerechte Wegekostenbelastung für Bahn und Straße;
  - Umwandlung der Kilometerpauschale in eine allgemeine Entfernungspauschale.
- Auf Gemeindeebene
  - Die Enquete-Kommission appelliert an alle Gemeinden, entsprechende Maßnahmen zur Reduktion des Energieverbrauchs und der Schadstoffemissionen, ganz besonders im Verkehrsbereich, im Rahmen ihrer Möglichkeiten vorzunehmen. Die Kommission empfiehlt zu diesem Zweck, Energie- und Verkehrskonzepte zu erstellen und am Leitindikator „CO<sub>2</sub>-Reduktion“ zu orientieren.

#### Investitionspolitik:

- Auf Bundesebene höhere Investitionen zur Förderung des umweltfreundlichen Verkehrs
  - Erweiterung der Kapazität der Bahn;
  - zügiger Ausbau des europäischen Hochgeschwindigkeits-Schienennetzes als Alternative zum Luft- und Straßenverkehr und Einbindung von Flughäfen in dieses Netz;
  - Übernahme der Fahrwegkosten der Bahn durch den Bund;
  - Ausbau des kombinierten Straßen- und Bahn-Güterverkehrs.
- Auf Bund-, Länder- und Gemeindeebene Förderung der
  - Investitionen zur Verstetigung des Verkehrsflusses: Allgemeine Einführung von Verkehrs-

leitsystemen auf Straßen und Flugleitsystemen zur Optimierung von Starts und Landungen;

- Bau unabhängiger Streckenführungen und Einsatz von Betriebsleitsystemen im öffentlichen Personennahverkehr;
- kombinierter Personenverkehr, zum Beispiel Park & Ride, Umweltabonnements, Einsatz von Kleinbussen und Taxen;
- Förderung des nichtmotorisierten Verkehrs für Kurzstrecken, zum Beispiel Ausbau von Radwegen, Ausbau verkehrsberuhigter Zonen.

Anreize zu Verhaltensänderungen:

- Werbekampagnen zu ökologischem Verkehrsverhalten, Aufklärung über die Umweltbelastung durch den Verkehr;
- Umwelt- und Verkehrserziehung (Aufklärung und Motivation) zur Erhöhung der sozialen Akzeptanz des Verzichtes auf Energiedienstleistungen, wo dies möglich ist.

Siedlungs- und Raumplanung:

- Als langfristige Maßnahme empfiehlt die Enquete-Kommission Veränderungen von Siedlungsstrukturen und Raumnutzungsplänen, die geeignet sind, den Energieeinsatz, die Schadstoffemissionen und andere ökologische Belastungen des Verkehrs zu vermindern.

Die Enquete-Kommission hält eine den oben genannten Maßnahmen entsprechende „integrierte umweltgerechte Verkehrsplanung“ für unabdingbar.

Das bedeutet, daß verkehrsträgerübergreifend unter Beteiligung aller relevanten Politikbereiche integrierte Verkehrsentwicklungspläne erarbeitet und im Hinblick auf die Reduzierung verkehrsbedingter Schadgasemissionen erstellt und umgesetzt werden sollen.

Hierbei sind Vorgaben unter anderem aus den Bereichen Umwelt und Energiepolitik sowie Raumordnung und Städtebau bei der Entwicklung von Maßnahmenkonzepten zu berücksichtigen. Auf allen Ebenen (Bund, Länder und Gemeinden) sind neue, umweltorientierte Verkehrsentwicklungspläne zu erstellen.

Daraus ergibt sich, daß Verkehrsmaßnahmen auf den oben genannten Ebenen nur verabschiedet (und demnach finanziert) werden können, wenn sie aus den oben definierten umweltgerechten Verkehrsentwicklungsplänen abgeleitet worden sind. Dies erfordert eine entsprechende ökologische Orientierung der Bundesverkehrswegeplanung sowie ein umweltfreundliches europaweites Verkehrskonzept.

### 2.4.3 Industrie und Kleinverbrauch

Die Kommission empfiehlt, intensive Anstrengungen zur rationelleren Energieverwendung in den Sektoren Industrie und Kleinverbrauch (Handwerk, Dienstleistungsbereich, öffentliche Einrichtungen, Organisationen ohne Erwerbscharakter, Landwirtschaft etc.) zu unternehmen, um durch eine Vielfalt spezifischer Maßnahmen die Emissionen aufgrund des anzuneh-

menden zukünftigen Wirtschaftswachstums abzufangen und darüber hinaus zu reduzieren.

Aufgrund der Inhomogenität der beiden Energiesektoren sieht es die Kommission in diesem Rahmen nicht als sinnvoll an, Detailangaben zu Maßnahmen der Emissionsreduktionen angesichts der Vielzahl der verschiedenen Verfahren und Produkte anzugeben. Sie verweist hierbei auf das 4. und 5. Kapitel sowie auf die einzelnen Arbeiten des Studienprogramms.

Im Hinblick auf übergreifende Reduktionsmöglichkeiten ersucht die Kommission die Bundesregierung,

- eine umfassende Ausgestaltung des Wärmenutzungsgebotes nach dem Bundesimmissionsschutzgesetz (BImSchG) durchzuführen,
- die Rahmenbedingungen für industrielle Kraft-Wärme-Kopplung (Eigenerzeugung) zu optimieren und
- ökonomisch attraktive Einspeisevergütungen von in der Industrie und im Kleinverbrauch eigenerzeugtem Strom aus Kraft-Wärme-Kopplungsanlagen und Anlagen zur Nutzung der erneuerbaren Energie vorzusehen.

Die Enquete-Kommission hält es für notwendig, in der Industrie, den Betrieben und Einrichtungen des Kleinverbrauchssektors sowie korrespondierend bei den Verbrauchern durch eine Vielzahl geeigneter Maßnahmen und Kaufentscheidungen den Energieeinsatz und die Schadstoffemissionen zu vermindern, zum Beispiel durch:

- Erstellung betrieblicher Energiekonzepte;
- Durchführung von Produktlinienanalysen über die gesamte Produktions- und Energiekette einschließlich vor- und nachgelagerter Bereiche;
- Herstellung und Verwendung von Produkten und Anwendung von Verfahren, die geeignet für Wiederverwendung oder Wiederverwertung sind;
- Höchstgrenzen, Effizienzstandards und Kennzeichnungspflicht beim Energieverbrauch von Massenprodukten, insbesondere von Elektrogeräten, wobei die Standards regelmäßig dem Stand der Technik angepaßt werden (Dynamisierung und Anpassung der Normen); dies soll allerdings nicht implizieren, daß in Benutzung befindliche Geräte vorzeitig aus dem Verkehr gezogen werden;
- Verbesserung der Informationen über den Energieverbrauch von Produkten, höhere Transparenz bei der Deklaration des Energieverbrauchs, stärkere Zusammenarbeit von Wirtschaft und Verbraucher- sowie Energieberatungsstellen;
- innerbetriebliche und außerbetriebliche Information, Weiter- und Fortbildung.

### 2.4.4 Energiewirtschaftssektor

Die Enquete-Kommission ersucht die Bundesregierung, geeignete Schritte zu unternehmen, damit die Energiewirtschaft durch Verbesserung der Energieeff-

fizienz erhebliche Reduktionen der Emissionen der klimarelevanten Spurengase bei der Energieumwandlung und -bereitstellung, insbesondere bei der Verbrennung der fossilen Energieträger, erzielt.

Dies betrifft zum einen den rechtlichen Rahmen und zum anderen die Verantwortung und Leistungsbereitschaft der Energiewirtschaft.

Die Kommission nennt einige Elemente für eine solchermaßen zu entwickelnde Strategie:

- Erstellung von Emissionsreduktionsplänen seitens der Energiewirtschaft;
- verstärkte Anwendung der Kraft-Wärme-Kopplung, vertragliche Vereinbarungen zur Abnahme des in diesen Anlagen, zum Beispiel in der Industrie, erzeugten Stroms und Ausbau der Nah/Fernwärme-Versorgung;
- erheblich stärkere Nutzung erneuerbarer Energien zur Stromerzeugung in Anlagen der Elektrizitätswirtschaft und im Kundenbereich;
- Optimierung der Reduktionspotentiale durch gezielte Informationen, Beratung, Investitionsangebote, Finanzierungshilfen im Kundenbereich, Contracting- und Drittfinanzierungsmodellen und so weiter im Sinne einer Minimalkostenplanung und eines energiedienstleistungsbezogenen Unternehmenskonzeptes;
- Überprüfung der Strom- und Erdgastarife und der Vertragsausgestaltung für Sonderabnehmer und Weiterverteiler im Hinblick auf die Erhöhung der Transparenz und ein Anreizsystem zur Energieeinsparung;
- Verbesserung des Wirkungsgrades von Kraftwerken beziehungsweise Heizkraftwerken;
- Ausschöpfung von Energieeinspar- und Emissionsminderungspotentialen im Raffineriebereich der Mineralölwirtschaft;
- Minimierung der Methan-Emissionen bei der Förderung von Steinkohle, Erdöl und Erdgas sowie Vermeidung von Leckageverlusten beim Transport und der Verteilung von Erdgas; weitestgehende energetische Nutzung von Grubengas im Steinkohlenbergbau; Systematische energetische Nutzung von Deponiegas.

## 2.5. Empfehlungen zur Fortführung der Arbeit der Enquete-Kommission in der nächsten Wahlperiode

Die Kommission betrachtet ihre Arbeit mit den vorgelegten Handlungsempfehlungen nicht als abgeschlossen. Wegen der Komplexität des Problembereichs, der außerordentlich tiefgehenden und umfangreichen, im einzelnen noch zu erarbeitenden internationalen und nationalen Maßnahmen und der im Hinblick auf den Beitritt der DDR sich für die nationalen Strategien ergebenden neuen Situation empfiehlt die Kommission dem Deutschen Bundestag, auch in der nächsten Wahlperiode eine Enquete-Kommission zum Schutz der Erdatmosphäre einzusetzen und damit die Arbeit

des Bundestages zu dieser ernstesten weltweiten Herausforderung mit der gebotenen Intensität weiterzuführen.

Die Kommission schlägt dem Deutschen Bundestag vor, in der nächsten Wahlperiode die Arbeit zum Schutz der Erdatmosphäre mit folgenden Schwerpunkten fortzusetzen:

- Vertiefung der Erarbeitung nationaler Umsetzungsmaßnahmen in den Endenergiesektoren Verkehr, Haushalte, Kleinverbrauch (Handwerk, Dienstleistungsbereich, öffentliche Einrichtungen etc.), Industrie sowie im Energieumwandlungssektor im Rahmen des in diesem Bericht vorgeschlagenen Reduktionsplans in der nächsten Wahlperiode. Dies ist besonders unter dem Gesichtspunkt des Beitritts der DDR notwendig. Die vorzusehenden Strategien sollen dabei, auf den Ergebnissen des Studienprogramms der Enquete-Kommission aufbauend, weiter konkretisiert werden. Dies liegt im Interesse einer sachgerechten Klärung energie-, verkehrs-, wirtschafts-, umwelt- und gesellschaftspolitischer Grundfragen.

Die Kommission empfiehlt weiterhin, in der nächsten Wahlperiode folgende Themenkomplexe zu bearbeiten:

- Landwirtschaft – Klima – Erdatmosphäre;
- aktueller wissenschaftlicher Sachstand zu den Veränderungen der Erdatmosphäre – insbesondere auch unter Beachtung der Chemie der Atmosphäre – und den Wechselwirkungen mit der Biosphäre;
- mögliche Auswirkungen der Klimaänderungen;
- Konkretisierung möglicher Maßnahmen auf nationaler, EG-weiter und weltweiter Ebene zur Eindämmung des zusätzlichen Treibhauseffektes sowie eventuell notwendig werdende Maßnahmen zur Verminderung von Folgeschäden der Klimaänderung;
- Verbesserung der Zusammenarbeit zwischen Industrieländern und Entwicklungsländern zur gemeinsamen Beratung der Problematik unter besonderer Berücksichtigung des Technologietransfers und einer bedarfsgerechten Technikentwicklung in den Entwicklungsländern;
- Bedeutung der Wechselwirkungen zwischen den zu erwartenden Klimaänderungen einschließlich ihrer Folgewirkungen und den Fragen der internationalen Sicherheit und Konfliktforschung.

## 3. Forschungsbedarf

Die folgenden Ausführungen zu den genannten Forschungsschwerpunkten stehen unter der Maßgabe, daß trotz vorhandener Kenntnislücken, die im Detail vorhanden sind, politische Maßnahmen keinesfalls verzögert werden dürfen. Die Bundesregierung wird ersucht, die skizzierten Forschungsarbeiten unverzüglich einzuleiten und parallel zu den Handlungsempfehlungen in Angriff zu nehmen. Der Forschungsbedarf bezieht sich auf alle energierelevanten Berei-

che, umfaßt insbesondere auch den Verkehrsbereich und betrifft sowohl die Energiebereitstellung und -umwandlung als auch die Endenergiesektoren.

Ungeachtet der Notwendigkeit sofortigen politischen Handelns ist die Enquete-Kommission der Auffassung, daß eine Vielzahl vertiefender, weiterführender Forschungsarbeiten zu folgenden Bereichen notwendig ist:

1. Kriterien zur Auswahl von Reduktionsstrategien,
2. Verbesserung der Datenbasis und Energiesystemanalyse,
3. Weiterentwicklung von Techniken und Verfahren, sowie Erforschung von Markteinführungsstrategien
4. Ausgestaltung von nationalen Maßnahmen,
5. Ausgestaltung internationaler Maßnahmen,
6. Reduktionsstrategien für die Bundesrepublik Deutschland nach dem Beitritt der DDR,
7. Europäisches Institut zur Behandlung globaler Umweltprobleme.

### 3.1 Kriterien zur Auswahl von Reduktionsstrategien

- Einbeziehung externer Kosten in die Nutzen-Kosten-Überlegungen.

Dies erfordert Forschung zu:

- Identifizierung, Quantifizierung, Monetarisierung oder nicht monetärer Bewertung externer Kosten der Bereitstellung und Nutzung von Energieträgern und der drohenden Klimaänderung insgesamt;
  - Quantifizierung der Reduktion externer Kosten bei Durchführung der Reduktionsstrategien sowie
  - Internalisierungsstrategien zur Einbeziehung in die Entscheidungskalküle.
- Auswirkungen von Reduktionsstrategien auf volkswirtschaftliche Ziele wie Beschäftigung, Preisstabilität, Wachstum, Außenhandel und Einkommensverteilung,
  - Untersuchung von Kriterien wie Flexibilität, Revidierbarkeit, Zukunftsoffenheit, Risikoarmut, Versorgungssicherheit und anderer im Hinblick auf Reduktionsstrategien,
  - Beachtung des Vorsorge- und Verursacherprinzips innerhalb wie zwischen den Staaten,
  - Akzeptanz und Durchsetzbarkeit.

### 3.2 Verbesserung der Datenbasis und Energiesystemanalyse

In fast allen Bereichen des Studienprogramms der Enquete-Kommission besteht ein Bedarf an detaillierten und aktuellen Daten, im Hinblick auf

- physikalisch-technische Grundlagen des Energieeinsatzes, von Energie und Exergie-Wirkungsgraden der rationellen Energieverwendung mit dem Ziel erheblicher Reduktionen energiebezogener Emissionen,
- energiestatistische Datenerhebungen besonders für Kleinverbrauch und Industrie,
- meßtechnisch abgesicherte Verbrauchszahlen,
- Kompatibilität von Datensätzen verschiedenen Ursprungs,
- Kostangaben über energiesparende Produkte und deren Markteinführung und andere Maßnahmen.

Darüber hinaus besteht Bedarf nach vertiefter Forschung in folgenden Bereichen:

- Systemanalysen zur zukünftigen Entwicklung von Energiebedarf und -angebot,
- Preisentwicklung fossiler Energieträger bei einer Politik zur Eindämmung des Treibhauseffektes,
- Herkunft und Ausmaß der Methanemissionen,
- Einspeisung fluktuierender Energien in Netzsysteme,
- Emissionsminderungsmöglichkeiten durch interne und externe Wärmenutzung, zum Beispiel in der Industrie- und im Kleinverbrauchssektor sowie durch Maßnahmen der Abfallwirtschaft (Abfallvermeidung, Recycling),
- Optimierung von Energiesystemen auch unter Klimagesichtspunkten,
- Berechnung der CO<sub>2</sub>-Äquivalenzwerte klimarelevanter Schadstoffemissionen, bezogen auf die Emissionen von CO<sub>2</sub>,
- Verbesserung der Emissionsdaten und Entscheidungshilfen durch Prozeßkettenanalysen und unter Einbezug von Produktionsverflechtungen, zum Beispiel durch die Anwendung von Input-Output-Analysen, Produktlinienanalysen etc., auch im Hinblick auf die Bedeutung energieintensiver Güter und Verfahren für die Außenhandelsbilanzen,
- Effizienz- und Wirkungsanalysen zu Maßnahmen der Energieeinsparung unter Berücksichtigung auch energiebewußten Verhaltens beziehungsweise Verminderung von Energiedienstleistungen und Fragen nach der bestmöglichen Information, Fort- und Weiterbildung etc..

### 3.3 Weiterentwicklung von Techniken und Verfahren sowie Erforschung von Markteinführungsstrategien

- Stärkere Ausrichtung der Grundlagenforschung und von Forschungseinrichtungen auf den Themenkomplex Klima-Ökologie-Energie, unter besonderer Berücksichtigung der Reduktion aller klimarelevanten energiebedingten Emissionen und ihrer Vermeidung, Rückhaltung und Eindämmung sowie der Vermeidung und Verminderung ökologischer und sozialer Risiken und Schäden;



- Weiterentwicklung und Erprobung von Methoden und Modellen zum integrierten Kostenvergleich und zur Bewertung von Energieangebots- und -nutzungstechniken sowie von Instrumenten zur Markteinführung kostenminimaler Energiedienstleistungen;
- Forschungs- und Entwicklungsarbeiten für Technologien und Verfahren zur rationelleren Energienutzung im Energie- und Verkehrsbereich einschließlich der Rahmenbedingungen zu ihrer Markteinführung sowie die Erforschung von Strategien, Instrumenten, Maßnahmenbündeln, Kosten und deren sozialen Wechselwirkungen.

Dies betrifft unter anderem folgende Bereiche:

- Erforschung und Entwicklung von Systemkomponenten (zum Beispiel in der Bauforschung) von verbesserten Niedrigenergie-Häusern, wie beispielsweise von opaken Dämmstoffen, transluzenter Wärmedämmung, von Verbundbauteilen für Vakuum-Super-Wärmedämmung, von Wärmerückgewinnungs- und Regelungsanlagen, von Bauteilen zur passiven Solarenergienutzung, von hocheffizienter Wärmeschutzverglasung, von hochwärmedämmten Fenster- rahmen und anderen Komponenten für den Wärmeschutz;
- Erforschung von Einführungsstrategien für neue Niedrigenergie-Häuser sowie Entwicklung von Techniken, Maßnahmen und Strategien zur stufenweisen Anpassung an Niedrigenergie-Standards im Gebäudebestand;
- Erforschung und Weiterentwicklung von hocheffizienten Elektrogeräten (beispielsweise FCKW-freie und energieminimierende Kühl- und Klimageräte), von kompakten elektronischen Energiesparlampen, von stromsparenden Antriebssystemen (Motoren) und anderes;
- Erforschung und marktgerechte Entwicklung von Katalysatoren, Enzymen, neuen Werkstoffen, Regeltechniken und von Verfahrenssubstitutionen zur rationelleren Energienutzung;
- Erforschung zur Energie- und Emissionsminimierung und zur Schließung von energieintensiven Stoffkreisläufen bei Stahl, Aluminium, Kupfer und anderen NE-Metallen, Kunststoffen, Glas, Papier/Pappe und der Resubstituierbarkeit energieintensiver Werkstoffe und Produkte;
- Systematischer Aufbau und Erhöhung des Differenzierungsgrades von Datenbasen über Techniken und Verfahren der rationelleren Energienutzung sowie deren Implementationskosten in der Industrie und im Kleinverbrauch;
- Forschungs- und Entwicklungsarbeiten für Technologien auf Basis erneuerbarer Energiequellen einschließlich der Erforschung von Rahmenbedingungen, Strategien, Instrumenten, Maßnahmenbündeln und Kosten zu ihrer forcierten Markteinführung.

Dies betrifft unter anderem folgende Bereiche:

- Erforschung von Strategien zur systematischen und breiten Markterschließung der Nutzung erneuerbarer Energien, wie zum Beispiel kleiner und mittlerer Windenergieanlagen, von Wasserkraftanlagen, Biogas-, Deponiegas- und Klärgasanlagen, solaren Niedertemperaturanlagen sowie Nahwärmenetzen;
- Forschungs- und Entwicklungsarbeiten sowie Pilot- und Demonstrationsanlagen zu großen Windenergieanlagen, auch off-shore-Anwendungen;
- Forschung und Entwicklung, auch zur großtechnischen Serienproduktion und Markteinführung, von Photovoltaikanlagen;
- Forschung und Entwicklung einschließlich Demonstrations- und Pilotanlagen für alle Systemkomponenten einer solaren Wasserstoffwirtschaft (einschließlich Brennstoffzellen etc.);
- Forschung und Entwicklung von Energiesystemen und Speichertechniken im Hinblick auf die mittel- und langfristige Nutzung der erneuerbaren Energien in erheblich größerem Umfang.
- Forschung und Weiterentwicklung erprobter und neuer Techniken und Verfahren rationellerer Energienutzung und integrierter Emissionsminderungen in den Energieumwandlungs- und Industriesektoren einschließlich der Verbesserung von Energie- und Exergiewirkungsgraden, das heißt, auch unter Berücksichtigung der Energiewertigkeit. Dies betrifft unter anderem alle Techniken der Kraft-Wärme-Kopplung, der Gas- und Dampfturbinen- Kombikraftwerke (GuD, zum Beispiel mit integrierter Kohlevergasung oder mit Druckwirbelschichtfeuerung), der Verstromung in Hochtemperaturzellen mit Synthese- oder Erdgas, von Wärmetauschern, der Brüdenkompression, von Wärmetransformatoren und von Hochtemperatur-Wärmepumpen.

### 3.4 Ausgestaltung nationaler Maßnahmen

Um ein schnelles Handeln zu ermöglichen, sind sowohl kurz- als auch längerfristig Forschungsarbeiten zur Ausgestaltung der Reduktionsmaßnahmen von höchster Eile und Bedeutung.

Dies betrifft insbesondere folgende Gebiete:

- Ausgestaltung von Maßnahmen zum Abbau von Hemmnissen der rationellen Energienutzung und -umwandlung sowie der Nutzung erneuerbarer Energien;
- organisatorische und institutionelle Voraussetzungen der Reduktionsstrategien;
- Ausgestaltung von Anreizinstrumenten und Programmen zur beschleunigten Einführung von Techniken der Energieeinsparung, rationellen Energienutzung und -umwandlung sowie der erneuerbaren Energien;
- vertiefte Forschung über die Wirkung preispolitischer Maßnahmen;

- Evaluierung von Methoden und Programmen zur Energieeinsparung im Ausland und konkrete Übertragungsmöglichkeiten auf Deutschland;
- Akzeptanz von Maßnahmen und Programmen der Energieeinsparung durch Verhaltensänderungen;
- Maßnahmen zur verbesserten Information, Bildung und Ausbildung, Fort- und Weiterbildung in allen relevanten Bereichen.

### 3.5 Ausgestaltung internationaler Maßnahmen

Um schnelles und koordiniertes Handeln weltweit und in der EG zu gewährleisten, müssen vermehrt Forschungsarbeiten zur Ausgestaltung der Reduktionsmaßnahmen auf internationaler Ebene vorgenommen werden. Dies betrifft besonders:

- Die Ermittlung der technischen und wirtschaftlichen Reduktionsmöglichkeiten für alle Mitgliedsländer der Europäischen Gemeinschaften sowie die Ermittlung der geeignetsten Maßnahmen für gemeinsame Reduktionsstrategien;
- Kriterien für unterschiedliche Reduktionspflichten innerhalb der Europäischen Gemeinschaften und zwischen Industrie- und Entwicklungsländern im Hinblick auf eine internationale Konvention über Klima und Energie als weltweite Strategie;
- Wirkungsanalyse ökonomischer Instrumente zur Ausgestaltung internationaler Übereinkommen;
- Möglichkeiten eines ökologischen und ökonomischen Lastenausgleiches zwischen Industrie- und Entwicklungsländern;
- institutionelle und instrumentelle Verbesserungen des Technologie- und Wissenstransfers, zum Beispiel von Industrieländern zu Entwicklungsländern (auch in Ländern Osteuropas);
- organisatorische, strukturelle und institutionelle Voraussetzungen weltweiter Reduktionsstrategien;
- weltwirtschaftliche Auswirkungen von Reduktionsstrategien;
- kulturelle und soziale Akzeptanz von Maßnahmen und Programmen der Reduktionsstrategien.

### 3.6 Reduktionsstrategien für die Bundesrepublik Deutschland nach dem Beitritt der DDR

Die auf dem Studienprogramm der Enquete-Kommission aufbauenden Reduktionsstrategien beziehen sich lediglich auf das bisherige Staatsgebiet der Bundesrepublik Deutschland, während die entsprechenden Informationen für das Gebiet der ehemaligen DDR nur bruchstückhaft vorliegen. Daraus folgt die Notwendigkeit, die im Studienprogramm der Enquete-Kommission durchgeführten Untersuchungen in gleichem Umfang auch für die Bundesrepublik Deutschland nach dem Beitritt der DDR vorzunehmen und daraus optimierte Gesamtstrategien abzuleiten.

### 3.7 Europäisches Institut zur Behandlung globaler Umweltprobleme

Die Enquete-Kommission ist der Auffassung, daß es durch die Zunahme globaler Umweltprobleme und deren komplexe Ursachen und Wechselwirkungen systematischer und interdisziplinärer Forschung und Politikberatung bedarf. Besonderer Handlungs- und Forschungsbedarf besteht bei der Erarbeitung von langfristigen Lösungsstrategien auf nationaler und internationaler Ebene, unter Berücksichtigung der Umsetzungsinstrumente sowie deren Wirkung und Kontrolle.

Insofern empfiehlt die Enquete-Kommission erstmals die Errichtung eines unabhängigen Forschungsinstituts mit europäischer Ausrichtung bis zum Jahr 1992. Hier sollen Natur-, Geistes- und Gesellschaftswissenschaften zusammengeführt werden.

Zwar gibt es vor allem in den USA Institutionen, die sich mit den Fragen des Erdökosystems und den Wechselwirkungen zwischen Ökonomie, Bevölkerungswachstum und Natur befassen, doch ist es nach Auffassung der Kommission an der Zeit, daß auch andere Industriestaaten und -regionen verstärkt die globalen Entwicklungen kompetent analysieren und die Politik beraten. Der Bedeutungszuwachs Europas in der Weltpolitik läßt es angezeigt sein, eine derartige Institution gesamteuropäisch zu organisieren.

Das Europäische Institut zur Behandlung von globalen Umweltproblemen soll sich beispielsweise mit folgenden Themen beschäftigen:

- Erfassung und Aufarbeitung globaler Umweltdaten,
- Schutz der Erdatmosphäre,
- Gesellschaftliche Auswirkungen von Klimaänderungen,
- Meeresverschmutzung,
- Biosphäre,
- Schutz der Wälder,
- Welternährung,
- Bevölkerungswachstum,
- Ökologisch verträgliche Weltwirtschaft,
- Soziale Strategien zur Emissionsminderung,
- Energieversorgung/Verkehrssysteme,
- Technologieabschätzung/Umweltverträglichkeitsraster,
- Erfolgskontrolle politischer Maßnahmen.

Die Enquete-Kommission empfiehlt der Bundesregierung, bis 1992 die Initiative für ein derartiges Institut zu ergreifen und ein konkretes Konzept zu entwickeln. Das Institut soll mit vorhandenen Einrichtungen intensiv zusammenarbeiten beziehungsweise deren Arbeit unterstützen. Denkbar ist auch, vorhandenen europäischen Instituten, die sich mit Umweltfragen befassen, die Gründungsaufgabe zu übertragen.

#### 4. Tabellenverzeichnis

- Tab. 1: Einige Rahmenannahmen des gemeinsamen „Anlyserasters“ der Untersuchungen zu den technischen Optionen der Emissionsminderung
- Tab. 2: Zusammenstellung der emissionsmindernden Maßnahmen in den Endenergiesektoren und im Kraft-Wärme-Kopplungs-Bereich für das Reduktionsszenario „Energiepolitik“ in Petajoule (PJ)
- Tab. 3: a) Gesamter Energieverbrauch, unterteilt nach Energieträgern, für die Bundesrepublik Deutschland (ohne ehemalige DDR) im Reduktionsszenario „Energiepolitik“ in Petajoule (PJ)
- b) Gesamter Energieverbrauch, unterteilt nach Energieträgern, für die Bundesrepublik Deutschland (ohne ehemalige DDR) im Reduktionsszenario „Energiepolitik“ in Millionen Tonnen SKE
- Tab. 4: a) Verbrauch von fossilen Energieträgern und Kernbrennstoffen in Petajoule (PJ) sowie CO<sub>2</sub>-Emissionen in Millionen Tonnen für die Bundesrepublik Deutschland (ohne ehemalige DDR) im Reduktionsszenario „Energiepolitik“
- b) Verbrauch von fossilen Energieträgern und Kernbrennstoffen in Millionen Tonnen SKE sowie CO<sub>2</sub>-Emissionen in Millionen Tonnen für die Bundesrepublik Deutschland (ohne ehemalige DDR) im Reduktionsszenario „Energiepolitik“
- Tab. 5: Zusammenstellung der emissionsmindernden Maßnahmen in den Endenergiesektoren und im Kraft-Wärme-Kopplungs-Bereich für das Reduktionsszenario „Kernenergieausstieg 2005“ in Petajoule (PJ)
- Tab. 6: a) Gesamter Energieverbrauch, unterteilt nach Energieträgern, für die Bundesrepublik Deutschland (ohne ehemalige DDR) im Reduktionsszenario „Kernenergieausstieg 2005“ in Petajoule (PJ)
- b) Gesamter Energieverbrauch, unterteilt nach Energieträgern, für die Bundesrepublik Deutschland (ohne ehemalige DDR) im Reduktionsszenario „Kernenergieausstieg 2005“ in Millionen Tonnen SKE
- Tab. 7: a) Verbrauch von fossilen Energieträgern und Kernbrennstoffen in Petajoule (PJ) sowie CO<sub>2</sub>-Emissionen in Millionen Tonnen für die Bundesrepublik Deutschland (ohne ehemalige DDR) im Reduktionsszenario „Kernenergieausstieg 2005“
- b) Verbrauch von fossilen Energieträgern und Kernbrennstoffen in Millionen Tonnen SKE sowie CO<sub>2</sub>-Emissionen in Millionen Tonnen für die Bundesrepublik Deutschland (ohne ehemalige DDR) im Reduktionsszenario „Kernenergieausstieg 2005“
- Tab. 8: Zusammenstellung der emissionsmindernden Maßnahmen in den Endenergiesektoren und im Kraft-Wärme-Kopplungs-Bereich für das Reduktions-Szenario „Ausbau der Kernenergie“ in Petajoule (PJ)
- Tab. 9: a) Gesamter Energieverbrauch, unterteilt nach Energieträgern, für die Bundesrepublik Deutschland (ohne ehemalige DDR) in Petajoule (PJ) im Reduktionsszenario „Kernenergieausbau“
- b) Gesamter Energieverbrauch, unterteilt nach Energieträgern, für die Bundesrepublik Deutschland (ohne ehemalige DDR) in Millionen Tonnen SKE im Reduktionsszenario „Kernenergieausbau“
- Tab. 10: a) Verbrauch von fossilen Energieträgern und Kernbrennstoffen in Petajoule (PJ) sowie CO<sub>2</sub>-Emissionen in Millionen Tonnen für die Bundesrepublik Deutschland (ohne ehemalige DDR) im Reduktionsszenario „Kernenergieausbau“

- b) Verbrauch von fossilen Energieträgern und Kernbrennstoffen in Millionen Tonnen SKE sowie CO<sub>2</sub>-Emissionen in Millionen Tonnen für die Bundesrepublik Deutschland (ohne ehemalige DDR) im Reduktionsszenario „Kernenergieausbau“
- Tab. 11: Vergleich der Emissionsminderungen energiebedingter klimarelevanter Spurengase in der Bundesrepublik Deutschland (ohne ehemalige DDR) für die drei Reduktionsszenarien für das Jahr 2005
- Tab. 12: a) Verbrauch von fossilen Energieträgern und Kernbrennstoffen in den drei Reduktionsszenarien für die Bundesrepublik Deutschland (ohne ehemalige DDR) nach Sektoren in Petajoule (PJ)
- b) Verbrauch von fossilen Energieträgern und Kernbrennstoffen in den drei Reduktionsszenarien für die Bundesrepublik Deutschland (ohne ehemalige DDR) nach Sektoren in Millionen Tonnen SKE
- Tab. 13: CO<sub>2</sub>-Emissionen, unterteilt nach Sektoren, in den drei Reduktionsszenarien für die Bundesrepublik Deutschland (ohne ehemalige DDR) in Millionen Tonnen
- Tab. 14: a) Gesamter Energieverbrauch, unterteilt nach Energieträgern, in den drei Reduktionsszenarien für die Bundesrepublik Deutschland (ohne ehemalige DDR) in Petajoule (PJ)
- b) Gesamter Energieverbrauch, unterteilt nach Energieträgern, in den drei Reduktionsszenarien für die Bundesrepublik Deutschland (ohne ehemalige DDR) in Millionen Tonnen SKE
- Tab. 15: Reduktionsplan der Enquete-Kommission zur Verringerung der CO<sub>2</sub>-Emissionen der Bundesrepublik Deutschland für das Jahr 2005 (verbindliches Reduktionsziel), sowie Zielorientierungen für die Jahre 2020 und 2050; alle Angaben in Millionen Tonnen CO<sub>2</sub>. Die angegebenen Prozentpunkte beziehen sich auf das Basisjahr 1987
- Tab. 16: Reduktionsplan der Enquete-Kommission zur Verminderung der energiebedingten klimarelevanten Spurengasemissionen der Bundesrepublik Deutschland für das Jahr 2005 (verbindliches Reduktionsziel) sowie für die Jahre 2020 und 2050 (Zielorientierung)

#### 5. Abbildungsverzeichnis

- Abb. 1: Schema der Komposition der Ergebnisse der Untersuchungen über die Minderungspotentiale zu drei Szenarien für 2005
- Abb. 2: Entwicklung des Energieverbrauchs, unterteilt nach Energieträgern, für die Bundesrepublik Deutschland (ohne ehemalige DDR) bis zum Jahr 2005 im Reduktionsszenario „Energiepolitik“
- Abb. 3: Entwicklung des Verbrauchs von fossilen Energieträgern und Kernbrennstoffen sowie CO<sub>2</sub>-Emissionen für die Bundesrepublik Deutschland (ohne ehemalige DDR) bis zum Jahr 2005 im Reduktionsszenario „Energiepolitik“
- Abb. 4: Entwicklung des Energieverbrauchs, unterteilt nach Energieträgern, für die Bundesrepublik Deutschland (ohne ehemalige DDR) bis zum Jahr 2005 im Reduktionsszenario „Kernenergieausstieg 2005“
- Abb. 5: Entwicklung des Verbrauchs von fossilen Energieträgern und Kernbrennstoffen sowie CO<sub>2</sub>-Emissionen für die Bundesrepublik Deutschland (ohne ehemalige DDR) bis zum Jahr 2005 im Reduktionsszenario „Kernenergieausstieg 2005“

Abb. 6: Entwicklung des Energieverbrauchs, unterteilt nach Energieträgern, für die Bundesrepublik Deutschland (ohne ehemalige DDR) bis zum Jahr 2005 im Reduktionsszenario „Kernenergieausbau“

Abb. 7: Entwicklung des Verbrauchs von fossilen Energieträgern und Kernbrennstoffen sowie CO<sub>2</sub>-Emissionen für die Bundesrepublik Deutschland (ohne ehemalige DDR) bis zum Jahr 2005 im Reduktionsszenario „Kernenergieausbau“

Abb. 8: Emissionsminderungen energiebedingter klimarelevanter Spurengase in der Bundesrepublik Deutschland (ohne ehemalige DDR) bis zum Jahr 2005 für die drei Reduktionsszenarien „Energiepolitik“, „Kernenergieausstieg 2005“ und „Ausbau der Kernenergie“

Abb. 9: Entwicklung des Verbrauchs von fossilen Energieträgern und Kernbrennstoffen in der Bundesrepublik Deutschland (ohne ehemalige DDR) bis zum Jahr 2005 in den drei Reduktionsszenarien „Energiepolitik“, „Kernenergieausstieg 2005“ und „Ausbau der Kernenergie“

Abb. 10: Entwicklung der CO<sub>2</sub>-Emissionen, unterteilt nach Sektoren, in der Bundesrepublik Deutschland (ohne ehemalige DDR) bis zum Jahr 2005 in den drei Reduktionsszenarien „Energiepolitik“, „Kernenergieausstieg 2005“ und „Ausbau der Kernenergie“

Abb. 11: Entwicklung des Energieverbrauchs, unterteilt nach Energieträgern, in der Bundesrepublik Deutschland (ohne ehemalige DDR) bis zum Jahr 2005 in den drei Reduktionsszenarien „Energiepolitik“, „Kernenergieausstieg 2005“ und „Ausbau der Kernenergie“

## 2. KAPITEL

### Energie und Klima – Einführung, Studienprogramm der Enquete-Kommission sowie energiewirtschaftliche Begriffe, Energieeinheiten und Umrechnungsfaktoren

#### 1. Energie und Klima – Einführung

Die Veränderungen der Erdatmosphäre, der zusätzliche Treibhauseffekt und die daraus resultierenden Klimaänderungen und Folgewirkungen sowie damit zusammenhängend die Rolle der klimarelevanten Emissionen aus dem Energiebereich, der Abbau der Ozonschicht in der Stratosphäre sowie die Vernichtung der tropischen Wälder stellen eine weltweite Gefährdung für die Menschheit und die ganze Biosphäre der Erde dar. Werden keine wirksamen Gegenmaßnahmen ergriffen, ist mit dramatischen Folgen für alle Regionen der Erde zu rechnen.

Die Abwendung dieses globalen Gefährdungspotentials oder – da ein Teil der Entwicklung schon nicht mehr zu vermeiden ist – zumindest seine Eindämmung ist zu einer der großen Herausforderungen für die Menschheit geworden. Maßnahmen, die der gegenwärtig beobachteten Veränderungen der Erdatmosphäre durch den Menschen Einhalt gebieten, sind daher dringend notwendig und erfordern neben entschlossenem nationalen Handeln eine weitreichende und umfassende internationale Zusammenarbeit.

##### 1.1 Zusätzlicher Treibhauseffekt und weltweite Klimaänderungen

Der natürliche Treibhauseffekt, der von den Gasen Wasserdampf (H<sub>2</sub>O), Kohlendioxid (CO<sub>2</sub>), Ozon (O<sub>3</sub>), Distickstoffoxid (N<sub>2</sub>O) und Methan (CH<sub>4</sub>), ihrer Bedeutung nach gereiht, hervorgerufen wird, bewirkt, daß die heutige Durchschnittstemperatur auf der Erde in Bodennähe rund 15 °C beträgt. Ohne diesen natürlichen Treibhauseffekt würde die globale Durchschnittstemperatur bei etwa –18 °C liegen.

Seit Beginn der Industrialisierung sind die Konzentrationen dieser Treibhausgase in der Atmosphäre durch

menschliche Tätigkeit angestiegen und zusätzliche Treibhausgase, vor allem die FCKW, hinzugekommen. Durch diesen zusätzlichen Treibhauseffekt wird der natürliche Treibhauseffekt verstärkt.

Der Anstieg der globalen Durchschnittstemperatur um 0,5 °C in den vergangenen 100 Jahren sowie der Anstieg des Meeresspiegels um 10 bis 20 cm im selben Zeitraum sind wahrscheinlich bereits auf den vom Menschen verursachten, zusätzlichen Treibhauseffekt zurückzuführen.

Nach dem gegenwärtigen wissenschaftlichen Kenntnisstand wird sich die globale Mitteltemperatur um etwa 5 °C (wahrscheinlichster Wert, wobei ein Unsicherheitsbereich von 3 bis 9 °C angegeben wird) gegenüber ihrem vorindustriellen Wert erhöhen, wenn die Emissionen von Treibhausgasen (Kohlendioxid, Fluorchlorkohlenwasserstoffe, Methan, Distickstoffoxid sowie Stickoxide, Kohlenmonoxid und flüchtige organische Verbindungen (außer Methan), aus denen sich Ozon in der Troposphäre bildet) mit denselben Raten wie zur Zeit bis zum Jahre 2100 ansteigen. Bis zu diesem Zeitpunkt werden von den 5 °C Erwärmung etwa 4 °C realisiert sein, da der Ozean die Erwärmung um einige Jahrzehnte verzögert. Diese Erwärmung in gut 100 Jahren wäre genauso groß wie die Erwärmung seit der letzten Eiszeit vor 18 000 Jahren (vgl. Abschnitt A, Abb. 2).

Wenn der Trend der Emissionen bis zum Jahr 2025 unverändert anhält, wird sich die globale Mitteltemperatur um etwa 2,5 °C (wahrscheinlichster Wert, wobei ein Unsicherheitsbereich von 1,5 bis 4,5 °C angegeben wird) über ihren vorindustriellen Wert erhöhen. Bis zum Jahr 2025 wird wegen der verzögernden Wirkung der Ozeane davon eine Temperaturerhöhung von etwa 2 °C realisiert sein.

Diese Ergebnisse stützen sich auch auf seit kurzem vorhandene Klimamodelle, die die Atmosphäre und

den Ozean koppeln. Die Größenordnung der Erwärmung wird durch Beobachtungen aus der Klimaschicht (Paläoklimatologie) gestützt.

Die Erwärmung wird sich gravierend auf die Ökosysteme und damit auf den Menschen auswirken, da sich die Atmosphäre während der vergangenen 10 000 Jahre nie so schnell erwärmt hat. Die Temperatur wird im Mittel um 0,3°C pro Dekade ansteigen, dreimal so schnell wie es natürliche Ökosysteme nach heutigem Wissen noch vertragen können. Es ist wahrscheinlich, daß wegen der starken natürlichen Schwankungen des Klimasystems zwischenzeitlich noch höhere Erwärmungsraten auftreten. Da die Temperatur so außerordentlich schnell steigt, werden sich die Klimazonen schneller verschieben, als die Vegetationszonen folgen können. Die unbelastete Vegetation kann vermutlich einer Temperaturerhöhung um 0,1°C pro Dekade gerade noch unbeschadet folgen. Eine bereits belastete Vegetation – wie die vom Waldsterben heimgesuchten Wälder in großen Teilen Europas – wird bereits durch eine geringere Erwärmung irreversibel geschädigt.

Die Aussage dieses Berichtes, daß sich die Erdatmosphäre um 3 bis 9°C gegenüber dem vorindustriellen

Wert erwärmen wird, wenn bis zum Jahre 2100 die Emissionen mit derzeitigem Trend weiter steigen, entspricht der früheren Aussage der Kommission in ihrem ersten Bericht. Demzufolge wird sich die Temperatur um 1,5 bis 4,5°C durch eine Verdopplung der CO<sub>2</sub>-Konzentration in der Atmosphäre und um 3 bis 9°C durch eine Vervierfachung erhöhen. Dasselbe gilt für eine Verdopplung beziehungsweise eine Vervierfachung der äquivalenten CO<sub>2</sub>-Konzentration, das heißt für einen Anstieg der Konzentrationen aller Treibhausgase in einem Maße, daß die gleiche Strahlungswirkung entsteht wie durch eine Verdoppelung beziehungsweise Vervierfachung der CO<sub>2</sub>-Konzentration allein. Die äquivalente CO<sub>2</sub>-Konzentration wird sich bei anhaltendem Trend etwa bis zum Jahr 2025 verdoppeln und bis zum Zeitabschnitt von 2080 bis 2100 vervierfachen.

Die globale Erwärmung führt bei unverändertem Trend der Emissionen unter anderem zu einem Anstieg des Meeresspiegels um 60 cm (Unsicherheitsbereich 30 bis 100 cm) bis zum Jahr 2100 und einem weiteren Anstieg in den folgenden Jahrhunderten. Dieser Anstieg kommt zum einen durch das größere Volumen des wärmeren Ozeanwassers und zum an-

Tabelle 1

**Prozentuale Anteile der Treibhausgase weltweit am zusätzlichen Treibhauseffekt bezogen auf ihre Konzentration<sup>1)</sup>**

Treibhausgase	1. kumuliert für die Zeitperiode von 1860 bis 1980	2. aktuelle Werte der achtziger Jahre: Zeitperiode von 1980 bis 1990
Kohlendioxid (CO <sub>2</sub> )	60 %	50 %
Fluorchlorkohlenwasserstoffe (FCKW)	9 %	22 %
Ozon (O <sub>3</sub> ) (Ozon wird aufgrund der Emission von Stickoxiden (NO <sub>x</sub> ), NMVOC, Kohlenmonoxid (CO) etc. gebildet) <sup>2)</sup>	10 %	7 % <sup>3)</sup>
Methan (CH <sub>4</sub> )	14 %	13 %
Distickstoffoxid (N <sub>2</sub> O)	3 %	5 %
stratosphärischer Wasserdampf (H <sub>2</sub> O)	4 %	3 % <sup>3)</sup>

<sup>1)</sup> In Tabelle 1 werden sowohl die kumulierten Anteile der einzelnen Treibhausgase seit Beginn der Industrialisierung bis zum Jahr 1980 (1. Spalte) als auch die derzeitigen Anteile der achtziger Jahre (2. Spalte) gerundet angegeben. Die in der zweiten Spalte angegebenen Anteile für die Zeitperiode von 1980 bis 1990 weichen aufgrund neuerer Berechnungen teilweise von den Angaben des ersten Berichtes der Kommission aus dem Jahr 1988 ab. Der Anteil des Methans wird beispielsweise als geringer angegeben, da hier nur die direkte Wirkung von Methan berücksichtigt wird (vgl. Abschnitt C, 1. Kapitel, 3.1). Eine Reduktion der prozentualen Werte beim Vergleich der Spalten 1 und 2 bedeutet wegen der hohen Zuwachsraten trotzdem noch einen Anstieg der absoluten Konzentration dieser Spurengase.

Im Abschlußbericht des Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) vom Sommer 1990 werden nur die prozentualen Anteile der Spurengase CO<sub>2</sub> mit 55 Prozent, FCKW mit 25 Prozent, CH<sub>4</sub> mit 14 Prozent und N<sub>2</sub>O mit 6 Prozent angegeben und die Prozentzahlen auf die Summe dieser Werte bezogen. Die Anteile für das Ozon in der Troposphäre und für den Wasserdampf in der Stratosphäre sind dort in den entsprechenden Tabellen wegen der großen Unsicherheitsbereiche nicht erfaßt. Deshalb differieren die prozentualen Anteile der Treibhausgase in Tabelle 1 von denen des IPCC-Abschlußberichtes, während dagegen die Werte der absoluten Beiträge der einzelnen Spurengase übereinstimmen (vgl. Abschnitt C, 1. Kapitel).

<sup>2)</sup> Der Anstieg der Ozonkonzentration ist auf die untere Atmosphäre der nördlichen Hemisphäre begrenzt. Die Angaben der Ozonanteile beruhen auf Schätzungen, da die Änderungen der Ozonkonzentration nicht gemessen sind, sondern aus Chemie-modellen erschlossen sind. NMVOC sind flüchtige organische Verbindungen (außer Methan).

<sup>3)</sup> Hierbei ist auf Unsicherheiten der angegebenen Werte hinzuweisen, da in die Berechnungen noch kein Klimamodell mit vollständigen chemischen Rückkopplungen einbezogen worden ist, das zu etwas anderen Werten führen könnte.

deren durch das Abschmelzen von Eis zustande. Bereits bei einem Anstieg des Meeresspiegels um 30 bis 50 cm werden viele küstennahe Gebiete und Inseln überschwemmt und die dort lebende Bevölkerung vertrieben werden.

Weiterhin muß bereits in naher Zukunft mit folgenden, sich laufend verstärkenden Auswirkungen gerechnet werden:

- Verschiebung der Klimazonen, zum Beispiel der Wüstenregionen;
- großräumiges klimabedingtes Waldsterben in den mittleren und höheren Breiten, das in den durch Immissionen vorgeschädigten Wäldern sehr schnell vordringen kann;
- Beeinträchtigung der Wasserressourcen vieler Gebiete;
- Verschlechterung der Ernährungssituation großer Teile der Menschheit durch Klima-anomalien (zum Beispiel Dürren, Überschwemmungen), Mißernten, vermehrte Schäden an landwirtschaftlichen Kulturpflanzen und andere Ursachen.

Dies alles wird Hunger, Elend und Umweltflüchtlingsströme in bisher nicht gekanntem Ausmaß zur Folge haben.

Der Problemdruck erhöht sich zudem dadurch, daß sich der zusätzliche Treibhauseffekt einerseits und die Ozonerstörung durch die FCKW in der Stratosphäre andererseits wechselseitig beeinflussen. Des weiteren müssen auch zusätzliche, verstärkende Rückkopplungen wie die Methanfreisetzung nach dem Auftauen der arktischen Permafrostböden, die heute noch nicht oder noch nicht merklich wirksam sind, berücksichtigt werden.

Zum zusätzlichen, vom Menschen verursachten weltweiten Treibhauseffekt tragen die Treibhausgase mit den in Tabelle 1 angegebenen Anteilen bei.

## 1.2 Energiebedingte klimarelevante Emissionen

Die direkten Treibhausgase Kohlendioxid (CO<sub>2</sub>), Fluorchlorkohlenwasserstoffe (FCKW), Methan (CH<sub>4</sub>) und Distickstoffoxid (N<sub>2</sub>O), sowie die weiteren klimarelevanten Spurengase, die an der Bildung von Ozon in der Troposphäre beteiligt sind — das heißt in erster Linie Stickoxide (NO<sub>x</sub>), Kohlenmonoxid (CO) und flüchtige organische Verbindungen außer Methan (NMVOC) — sind nach dem derzeitigen wissenschaftlichen Kenntnisstand weltweit gegenwärtig folgenden Bereichen mit den genannten (gerundeten) Anteilen zuzuordnen (vgl. auch Tab. 1 und 2 sowie Abschnitt A, Abb. 3):

- dem Energiebereich einschließlich des Verkehrsbereichs mit einem Anteil von rund 50 Prozent infolge der Nutzung der fossilen Energieträger Kohle, Erdöl und Erdgas:
  - rund 40 Prozent CO<sub>2</sub>,
  - rund 10 Prozent weitere energiebedingte Spurengase, insbesondere Methan (CH<sub>4</sub>) und Ozon der Troposphäre, das aufgrund der Emissionen

von Stickoxiden (NO<sub>x</sub>), Kohlenmonoxid (CO) und flüchtigen organischen Verbindungen außer Methan (NMVOC) gebildet wird;

- dem Bereich chemischer Produkte und ihrer Anwendungen mit einem Anteil von rund 20 Prozent wegen der Emissionen von Fluorchlorkohlenwasserstoffen (FCKW), Halonen und anderen Verbindungen, die sowohl zum Abbau der Ozonschicht in der Stratosphäre als auch zum zusätzlichen Treibhauseffekt beitragen;
- dem Prozeß der Vernichtung vor allem der tropischen Wälder mit einem Anteil von rund 15 Prozent:
  - rund 10 Prozent Kohlendioxid (CO<sub>2</sub>),
  - rund 5 Prozent weitere Spurengase, die in erster Linie durch die Verbrennung und Verrottung der Wälder freigesetzt werden, insbesondere Distickstoffoxid (N<sub>2</sub>O), Kohlenmonoxid (CO) und Methan (CH<sub>4</sub>);
- der Landwirtschaft und anderen Bereichen mit einem Anteil von rund 15 Prozent: in erster Linie Methan (CH<sub>4</sub>) durch Rinderhaltung, Naßreisbau und anderes, Distickstoffoxid (N<sub>2</sub>O) infolge von Düngung, Methan infolge von Mülldeponien, CO<sub>2</sub> infolge der Zementherstellung etc.

Bei der Gewinnung von Kohle, Erdöl und Erdgas, beim Transport und der Verteilung von Erdgas, bei der Energieumwandlung in Kraftwerken und Raffinerien und bei sonstigen Umwandlungsprozessen sowie bei der Nutzung der fossilen Energieträger Kohle, Erdöl und Erdgas in den Endenergiesektoren Haushalte, Kleinverbrauch (Handwerk, Dienstleistungsbereich, öffentliche Einrichtungen etc.), Industrie und Verkehr trägt der Energiebereich weltweit mit insgesamt rund 50 Prozent zum zusätzlichen Treibhauseffekt bei. Dieser Beitrag wird verursacht durch die Emission von Kohlendioxid (rund 40 Prozent) und die Emissionen von Methan, Stickoxiden, Kohlenmonoxid und flüchtigen organischen Verbindungen ohne Methan (zusammen rund 10 Prozent).

Im Jahr 1987, das als Basisjahr bei den Studien der Enquete-Kommission verwendet wurde, trugen

- die fossilen Energien mit einem Anteil von 88,1 Prozent,
- die Wasserkraft mit einem Anteil von 6,7 Prozent
- und die Kernenergie mit einem Anteil von 5,2 Prozent

zum gesamten kommerziellen Primärenergieverbrauch der Welt in Höhe von 327 Exajoule (gleich 11,2 Milliarden Tonnen Steinkohleeinheiten (Mrd. t SKE)) bei.

Die weltweiten Kohlendioxid-Emissionen aus dem kommerziellen Energiebereich betragen im Basisjahr 1987 rund 20,5 Milliarden (Mrd.) Tonnen. Dabei wurden dem nichtenergetischen Energieverbrauch (beispielsweise für Kunststoffe, chemische Fasern oder Bitumen) hier keine Emissionen zugeordnet. Aufgrund der Datenlage muß ein Fehler in der Größenordnung von +/- 10 Prozent angenommen werden.

**Derzeitige Anteile der verschiedenen Verursacherebereiche weltweit am zusätzlichen, anthropogen bedingten Treibhauseffekt<sup>1)</sup>**

(CO<sub>2</sub>=Kohlendioxid; CH<sub>4</sub>=Methan; NO<sub>x</sub>=Stickoxide; CO=Kohlenmonoxid; NMVOC=flüchtige organische Verbindungen (außer Methan); FCKW=Fluorchlorkohlenwasserstoffe; N<sub>2</sub>O=Distickstoffoxid=Lachgas)

Verursacheregruppen	Anteile (grob gerundet)	Aufteilung auf die Spurengase (grob gerundet)	Ursachen
Energie einschließlich Verkehr	50 %	40 % CO <sub>2</sub> , 10 % CH <sub>4</sub> u. O <sub>3</sub> (O <sub>3</sub> wird durch die Vorläufersubstanzen NO <sub>x</sub> , CO und NMVOC gebildet)	Emissionen der Spurengase aufgrund der Nutzung der fossilen Energieträger Kohle, Erdöl und Erdgas sowohl im Umwandlungsbereich, insbesondere bei der Strom- und Fernwärmeerzeugung sowie Raffinerien, als auch in den Endenergiesektoren Haushalte, Kleinverbrauch (Handwerk, Dienstleistungen, öffentliche Einrichtungen etc.), Industrie und Verkehr
Chemische Produkte (FCKW, Halone u. a.) <sup>2)</sup>	20 %	20 % FCKW, Halone etc.	Emissionen der FCKW, Halone etc.
Vernichtung der Tropenwälder	15 %	10 % CO <sub>2</sub> , 5 % weitere Spurengase, insb. N <sub>2</sub> O, CH <sub>4</sub> und CO	Emission durch die Verbrennung und Verrottung tropischer Wälder einschließlich verstärkter Emissionen aus dem Boden
Landwirtschaft und andere Bereiche (Mülldeponien etc.)	15 %	15 %, in erster Linie CH <sub>4</sub> , N <sub>2</sub> O und CO <sub>2</sub>	Emissionen aufgrund von: – anaeroben Umsetzungsprozessen (CH <sub>4</sub> durch Rinderhaltung, Reisfelder etc.) – Düngung (N <sub>2</sub> O) – Mülldeponien (CH <sub>4</sub> ), – Zementherstellung (CO <sub>2</sub> ) – etc.

<sup>1)</sup> Die Enquete-Kommission hat diese gerundeten Werte bereits in den vergangenen Monaten angegeben. Im Hinblick auf die Spannweite der Anteile der einzelnen Spurengase am zusätzlichen Treibhauseffekt und auf die großen Unsicherheitsbereiche bei der Zuordnung der einzelnen Treibhausgase zu den verschiedenen Bereichen können gegenwärtig nur grob gerundete Näherungswerte angegeben werden (vgl. dazu auch Tab. 1 und 2, Abb. 3 sowie Abschnitt C, 1. Kapitel). Die hier angegebenen Anteile stimmen im Rahmen der vorhandenen Spannweiten und Unsicherheiten mit den Werten des IPCC-Abschlußberichtes vom Sommer 1990 überein.

Dieser IPCC-Bericht gibt für die einzelnen Bereiche folgende Anteile und Spannweiten an:

- Energie: 46 % (38 bis 54 %),
- chemische Produkte (FCKW, Halone u. a.): 24 % (keine Angabe von Spannweiten, obwohl die Absorptionskoeffizienten im Verhältnis zu denen von CO<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub> und N<sub>2</sub>O unsicher sind),
- Zerstörung der Wälder: 18 % (9 bis 26 %),
- Landwirtschaft: 9 % (4 – 13 %),
- andere Bereiche (Mülldeponien, Zementherstellung etc.): 3 % (1–4 %)

<sup>2)</sup> FCKW, Halone und andere Verbindungen, die sowohl zu einem Abbau der Ozonschicht in der Stratosphäre als auch zum zusätzlichen Treibhauseffekt beitragen

In den vergangenen beiden Jahrzehnten stieg der weltweite Energieeinsatz jährlich um durchschnittlich rund 2 Prozent, wobei der Anstieg im Jahr 1989 rund 3,5 Prozent betrug. Wenn der Trend des Energieverbrauchs der vergangenen beiden Jahrzehnte sich unverändert fortsetzen würde, würden sich gemäß den im Studienprogramm der Kommission untersuchten

Energieszenarien die weltweiten Emissionen aus dem Energiebereich – bezogen auf das hier verwendete Basisjahr 1987 – bis zum Jahr 2005 um rund 40 Prozent erhöhen und bis zum Jahr 2050 etwa verdoppeln. Die Eindämmung des zusätzlichen Treibhauseffektes erfordert es jedoch, bezogen auf die Werte des Jahres 1987,

Tabelle 3

**Energiebedingte CO<sub>2</sub>-Emissionen, Anteile an den weltweiten CO<sub>2</sub>-Emissionen und CO<sub>2</sub>-Emissionen pro Kopf für das Jahr 1986 für die größten Emittenten <sup>1)</sup>**

Land	CO <sub>2</sub> -Emissionen aus dem Energiebereich, in Mio. t	Anteil an den weltweiten energiebedingten CO <sub>2</sub> -Emissionen, in %	spezifische CO <sub>2</sub> -Emissionen aus dem Energiebereich, in t pro Kopf
1. USA .....	4 766	23,8	19,7
2. UdSSR .....	3 737	18,6	13,2
3. VR China .....	2 030	10,1	1,9
4. Bundesrepublik Deutschland (einschließlich der ehemaligen DDR) .....	1 067	5,3	13,7
davon:			
– Bundesrepublik Deutschland <sup>2)</sup> (ohne ehemalige DDR) .....	715	3,6	11,7
– ehemalige DDR .....	352	1,8	21,2
5. Japan .....	914	4,6	7,5
6. Großbritannien .....	676	3,4	11,9
7. Indien .....	539	2,7	0,7
8. Polen .....	478	2,4	12,7
9. Kanada .....	436	2,2	17,0
10. Frankreich/Monaco .....	384	1,9	6,9
11. Italien/San Marino .....	365	1,8	6,4
12. Südafrika .....	293	1,5	7,7
13. Mexiko .....	266	1,3	3,3
14. Australien .....	245	1,2	15,2
15. Tschechoslowakei .....	244	1,2	15,7
16. Rumänien .....	212	1,1	9,2
17. Niederlande .....	203	1,0	13,9
18. Spanien .....	189	0,9	4,9
19. Brasilien .....	175	0,9	1,3
20. Korea (Süd) .....	162	0,8	3,9
21. Korea (Nord) .....	156	0,8	7,5
22. Jugoslawien .....	128	0,6	5,5
23. Bulgarien .....	122	0,6	13,6
24. Türkei .....	118	0,6	2,3
25. Belgien .....	112	0,6	11,3
26. Venezuela .....	106	0,5	6,0
27. Iran .....	105	0,5	2,4
28. Saudi Arabien .....	101	0,5	7,4
29. Argentinien .....	99	0,5	3,2

- die Emission von Kohlendioxid bis zur Mitte des nächsten Jahrhunderts zu halbieren, das heißt, gegenüber der Trendentwicklung (Verdoppelung bis zum Jahre 2050) um 75 Prozent zu vermindern sowie
- die Emissionen der weiteren energiebedingten klimarelevanten Spurengase, in erster Linie von Methan, Stickoxiden, Kohlenmonoxid und flüchtigen organischen Verbindungen (ohne Methan), um mehr als 50 Prozent zu reduzieren.

Dabei ist von folgender Situation auszugehen:

Die westlichen und östlichen Industrieländer mit einem Bevölkerungsanteil von rund 25 Prozent emittieren heute zusammen rund 80 Prozent des CO<sub>2</sub>, die Entwicklungsländer (einschließlich China) mit einem Bevölkerungsanteil von rund 75 Prozent emittieren zusammen rund 20 Prozent. (Die Emissionsanteile von 80 Prozent in den Industrieländern und 20 Prozent in den Entwicklungsländern sind dabei als grobe Näherung anzusehen, da die Aufteilung je nach Zugehörig-



Energiebedingte CO<sub>2</sub>-Emissionen, Anteile an den weltweiten CO<sub>2</sub>-Emissionen und CO<sub>2</sub>-Emissionen pro Kopf für das Jahr 1986 für die größten Emittenten<sup>1)</sup>

Land	CO <sub>2</sub> -Emissionen aus dem Energiebereich, in Mio. t	Anteil an den weltweiten energiebedingten CO <sub>2</sub> -Emissionen, in %	spezifische CO <sub>2</sub> -Emissionen aus dem Energiebereich, in t pro Kopf
30. Indonesien .....	98	0,5	0,6
31. Ungarn .....	83	0,4	7,8
32. Dänemark .....	67	0,3	13,0
33. Ägypten .....	66	0,3	1,3
34. Griechenland .....	58	0,3	5,8
35. Österreich .....	55	0,3	7,2
36. Schweden .....	55	0,3	6,5
37. Finnland .....	53	0,3	10,8
38. Algerien .....	52	0,3	2,3
39. Thailand .....	49	0,2	0,9
40. Pakistan .....	47	0,2	0,5
41. Kolumbien .....	45	0,2	1,5
42. Schweiz/Liechtenstein .....	42	0,2	6,4
43. Nigeria .....	34	0,2	0,3
44. Malaysia .....	33	0,2	2,1
45. Kuba .....	32	0,2	3,1
46. Norwegen .....	31	0,2	7,5
47. Irland .....	30	0,2	8,4
48. Philippinen .....	28	0,1	0,5
49. Portugal .....	27	0,1	2,7
72. Luxemburg .....	9	0,1	24,6
Zwischensumme: .....	19 422	96,8	
davon EG (ohne ehemalige DDR) .....	2 835	14,1	8,8 im Durchschnitt
davon EG (einschl. ehemaliger DDR) .....	3 187	15,9	9,4 im Durchschnitt
weltweite Emissionen .....	20 055	100	4,1 im Durchschnitt

<sup>1)</sup> nach: Umweltbundesamt auf der Basis: Energy Statistics Yearbook, UN, New York 1988 mit Daten des Jahres 1986; Energy Balances of OECD Countries 1985/1986, Paris 1986; World Energy Statistics and Balances 1971-1987, OECD, Paris 1989. Die UN-Daten lagen für das Jahr 1987 noch nicht vor, so daß hier die Werte des Jahres 1986 verwendet wurden. Die Emissionen umfassen nicht den nichtenergetischen Energieverbrauch, dem damit keine Emissionen zugeordnet wurden. Die Werte erfassen ferner nicht die energiebedingten Emissionen der weiteren klimarelevanten Spurengase, die, in CO<sub>2</sub>-Äquivalenzen umgerechnet, zu den CO<sub>2</sub>-Emissionen addiert werden müßten, um die gesamten Emissionen aus dem Energiebereich, nach Ländern gegliedert, zu erhalten. Die internationalen und nationalen Statistiken differieren, so daß eine Ungenauigkeit für den weltweiten Wert in der Größenordnung von +/- 10 Prozent, für einzelne Länder möglicherweise in noch größerem Umfang, anzunehmen ist. Daraus ergibt sich u. a. die Notwendigkeit, diese Werte in Zukunft exakter und schneller zu erfassen. Die ausführliche Tabelle ist in Abschnitt F (1. Kapitel, Tabelle 1) enthalten.

<sup>2)</sup> Der Wert von 715 Mio. t CO<sub>2</sub>-Emissionen für die Bundesrepublik Deutschland im Jahr 1987 wurde im Rahmen des Studienprogramms für die Enquete-Kommission ermittelt und aus Konsistenzgründen auch in dieser Tabelle verwendet. Die o.g. internationalen Statistiken weisen für die energiebedingten CO<sub>2</sub>-Emissionen (ohne nichtenergetischen Verbrauch) der Bundesrepublik Deutschland für das Jahr 1986 754 Mio. t aus, was rund 3,7 Prozent des weltweiten Wertes entspricht.

keit zu einer der beiden Ländergruppen schwankt und zukünftig eine differenzierte Erfassung erfolgen muß.) (vgl. auch Abb. 1)

Im Hinblick auf die erforderliche Verringerung der weltweiten Emissionen erwächst den Industrieländern die Aufgabe, ihre hohen Pro-Kopf-Emissionen erheblich zu reduzieren. Die Entwicklungsländer sind vor die Aufgabe gestellt, ihren Energieeinsatz so effizient wie möglich und mit geringstmöglichen Emissionen zu gestalten. Da der Energiebedarf unter anderem auch von der Bevölkerungszahl abhängt, stehen die Entwicklungsländer zusätzlich vor der schwierigen Aufgabe, ihre gegenwärtig hohen Bevölkerungszuwachsraten mit geeigneten Maßnahmen zu begrenzen, was aus einer Reihe anderer Gründe, wie der Bekämpfung von Hunger und Armut, ohnehin notwendig ist.

Die EG verbrauchte im Bezugsjahr 1987 insgesamt rund 44 Exajoule, also rund 1,5 Milliarden Tonnen Steinkohleeinheiten; das entspricht etwa einem Siebtel (rund 14,3 Prozent) des kommerziellen, weltweiten Energieverbrauchs. Dabei entfielen rund 85 Prozent auf die Verbrennung fossiler Energieträger.

Die EG emittierte im Jahr 1986 rund 2,8 Milliarden Tonnen CO<sub>2</sub>, was etwa 14,2 Prozent der weltweiten Emissionen entspricht. Rechnet man die Emissionen der ehemaligen DDR für dieses Jahr in die EG-Werte ein, so ergeben sich Emissionen von rund 3,2 Milliarden Tonnen CO<sub>2</sub> beziehungsweise ein Anteil von rund 16 Prozent an den weltweiten Emissionen. (vgl. Abb. 2)

In bezug auf die nationale Situation ergibt sich folgendes Bild:

Im Jahr 1987 betrug der Primärenergieverbrauch der Bundesrepublik Deutschland rund 11,4 Exajoule, das sind 388 Millionen Tonnen Steinkohleeinheiten, wovon die fossilen Energien einen Anteil von etwa 86 Prozent hatten.

Aufgrund des Energieverbrauchs wurden von der Bundesrepublik Deutschland im Jahr 1987 rund 715 Millionen Tonnen CO<sub>2</sub> emittiert (endenergeseitig berechnet, ohne nichtenergetischen Verbrauch, unter Einbeziehung des bundesdeutschen Anteils am internationalen Flugverkehr). Das entspricht etwa 3,5 Prozent der weltweit freigesetzten Menge von rund 20,5 Milliarden Tonnen CO<sub>2</sub> aus dem kommerziellen Energiebereich. Pro Einwohner wurden von der Bundesrepublik Deutschland rund 11,7 Tonnen CO<sub>2</sub> im Jahr emittiert.

Der Primärenergieverbrauch der ehemaligen DDR betrug im Jahr 1987 rund 3,7 Exajoule. Dies entspricht rund 125 Millionen Tonnen Steinkohleeinheiten. Die fossilen Energien hatten daran einen Anteil von rund 96 Prozent. Die ehemalige DDR emittierte im Jahr 1987 rund 350 Millionen Tonnen CO<sub>2</sub> (vorläufiger Wert), was etwa 1,7 Prozent der weltweit aus dem kommerziellen Energiebereich freigesetzten Menge entspricht. Pro Einwohner und Jahr wurden von der ehemaligen DDR rund 21,2 Tonnen CO<sub>2</sub> emittiert. Dies ist eine der höchsten Pro-Kopf-Emissionswerte im weltweiten Vergleich.

Die Bundesrepublik Deutschland und die ehemalige DDR emittierten im Jahr 1987 zusammen rund 1 065

Millionen Tonnen CO<sub>2</sub>, trugen damit insgesamt mit einem Anteil von rund 5,3 Prozent zu den weltweiten energiebedingten CO<sub>2</sub>-Emissionen bei und emittierten rund 13,7 t CO<sub>2</sub> pro Person. Die Bundesrepublik Deutschland einschließlich der ehemaligen DDR standen daher im Jahr 1986 nach den USA mit rund 23,8 Prozent, der UdSSR mit rund 18,6 Prozent und der Volksrepublik China mit rund 10,1 Prozent an vierter Stelle der Rangfolge der CO<sub>2</sub>-Emittenten.

Diese Zahlen und die weiteren energiebedingten Schadstoffemissionen (Stickoxide, Methan, Kohlenmonoxid, flüchtige organische Verbindungen (außer Methan) belegen die große Bedeutung des Energiebereichs für die Volkswirtschaften. Sie verdeutlichen, daß in diesem mit rund 50 Prozent Anteil zum zusätzlichen Treibhauseffekt beitragenden Bereich vielschichtige und abgestimmte Reduktionsstrategien entwickelt werden müssen.

Die Reduktion der energiebedingten klimarelevanten Spurengasemissionen stellt Politik, Wirtschaft und Verbraucher vor außerordentlich schwierige Aufgaben wegen

- der hohen Komplexität und Vielschichtigkeit der Energieproblematik,
- des Anteils der fossilen Energieträger von knapp 90 Prozent am kommerziellen weltweiten Primärenergieaufkommen sowie
- der langen Zeiträume, die auch nach unverzüglich eingeleiteten Maßnahmen vergehen, bis eine Wirkung eintritt.

## 2. Studienprogramm der Enquete-Kommission – Einführung

Um ein wissenschaftliches Fundament für die Möglichkeiten und Notwendigkeiten für die im 1. Kapitel beschriebenen intensiven Reduktionen der Spurengasemissionen zu erarbeiten, hat die Enquete-Kommission Vorsorge zum Schutz der Erdatmosphäre des Deutschen Bundestages im Jahr 1989 einvernehmlich ein umfangreiches Studienprogramm zum Thema „Internationale Konvention zum Schutz der Erdatmosphäre sowie Vermeidung und Reduktion energiebedingter klimarelevanter Spurengase“ unter Beteiligung von 50 wissenschaftlichen Instituten mit rund 150 Studien in Auftrag gegeben und im Sommer 1990 abgeschlossen.<sup>1)</sup>

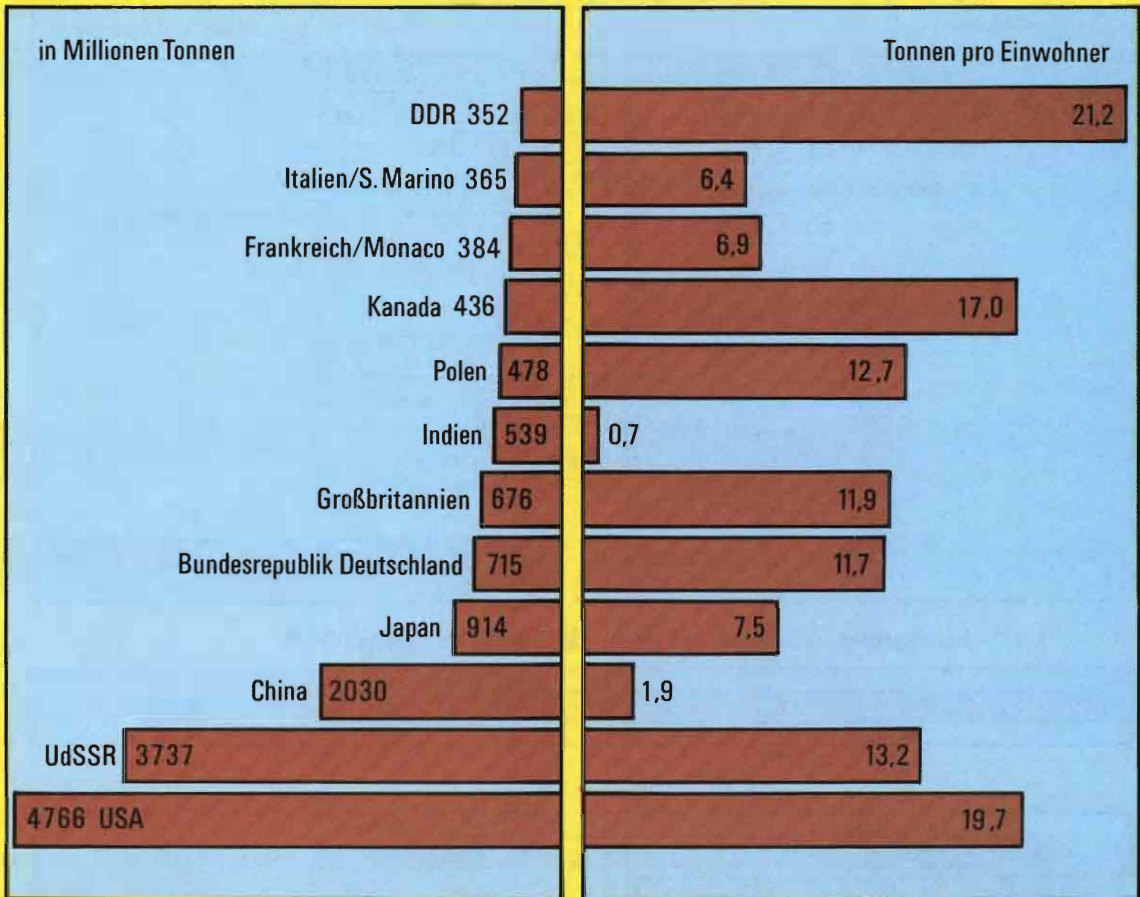
Eine Übersicht über die Studien und die beauftragten Institute enthält das 6. Kapitel.

Dieses Vorhaben bedeutete eine in der kurzen Zeitspanne bisher kaum vorstellbare originäre Leistung, insbesondere da

- die Dimension, die Vielschichtigkeit und der Zeitdruck des Problembereichs Treibhauseffekt eine neue Herausforderung für die Reaktion des Deut-

<sup>1)</sup> Die Abschlußberichte des gesamten Studienprogramms erscheinen parallel zu diesem dritten Bericht der Kommission im Herbst 1990 in einer 10bändigen Verlagsausgabe (Economica Verlag, Bonn, und Verlag C.F. Müller, Karlsruhe) und sind im Buchhandel erhältlich.

### CO<sub>2</sub>-Emissionen



#### Bundesrepublik Deutschland (einschließlich der ehemaligen DDR)



#### EG (einschließlich der ehemaligen DDR)

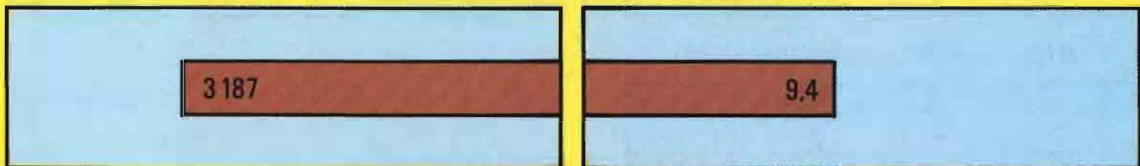


Abb. 1: Energiebedingte CO<sub>2</sub>-Emissionen der größten Emittenten und Emissionen pro Kopf im Jahr 1986 in Millionen Tonnen bzw. in Tonnen CO<sub>2</sub> per capita (Quelle: vgl. Tab. 3)

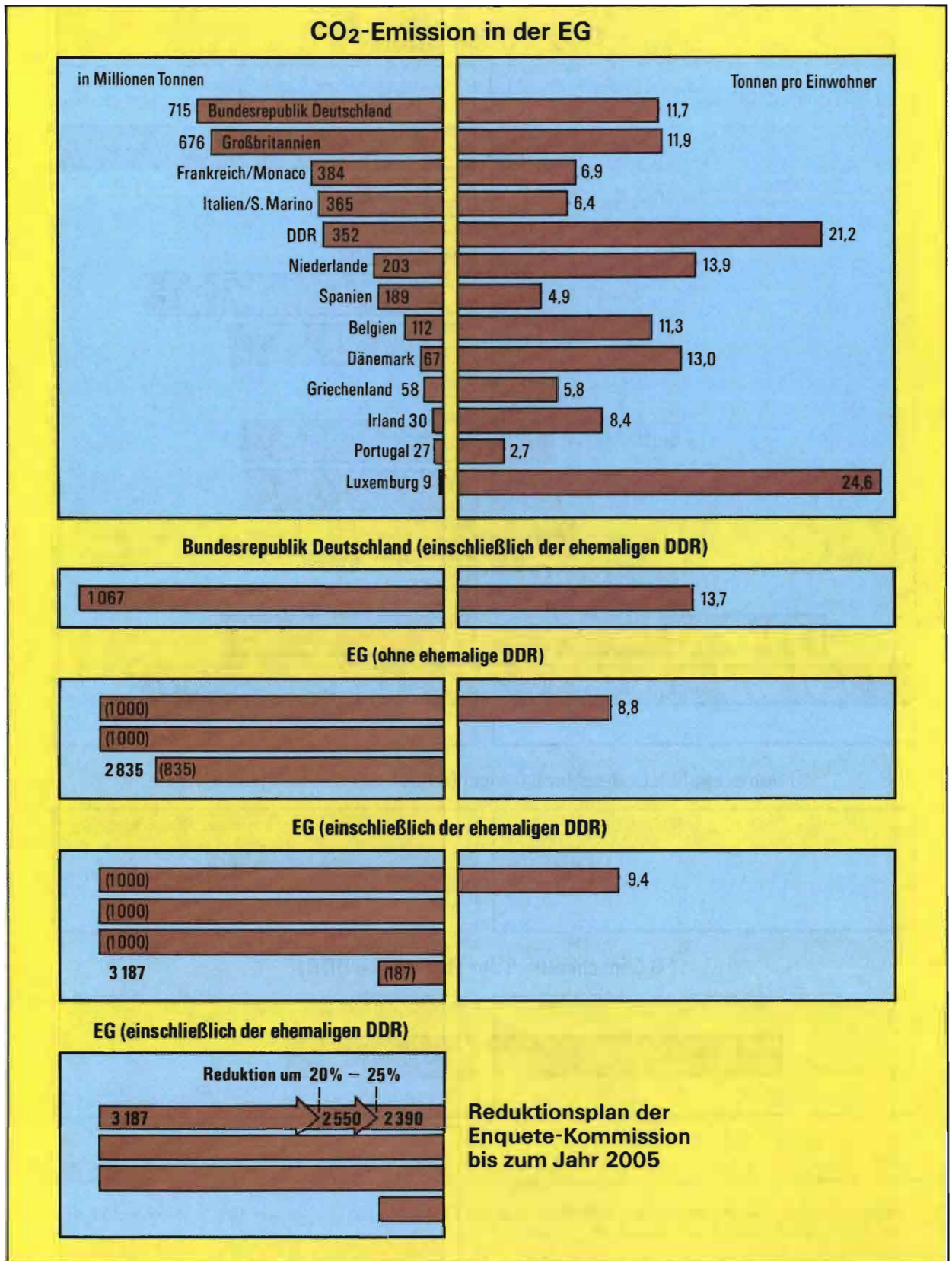


Abb. 2: Energiebedingte CO<sub>2</sub>-Emissionen der EG-Mitgliedstaaten und der EG insgesamt, in Millionen Tonnen CO<sub>2</sub> und in Tonnen CO<sub>2</sub> pro Kopf im Jahr 1986 (Quelle: s. Tab. 3)

schen Bundestags und der zu Rate gezogenen Wissenschaft darstellt,

- die bisher veröffentlichten Studien überwiegend nicht unter der hier gestellten Frage erarbeitet worden sind, so daß ihre Ergebnisse in schwierigen Arbeitsprozessen erst vergleichbar gemacht werden müssen,
- das internationale Wissen verfügbar gemacht werden muß,
- Energiereduktionen und -veränderungen in Emissionsminderungen umgesetzt werden müssen,
- Nebenwirkungen unter der neuen Fragestellung dargestellt werden müssen,
- mit der Darstellung der Hemmnisse und Lösungsansätze zu deren Überwindung in Anbetracht der Tiefe der notwendigen Änderung der Energiestruktur Neuland betreten wird,
- Wissensdefizite im Hinblick auf die Lösung dieses neuen globalen Problems aufgeführt werden müssen,
- Problemlösungsstrategien auf nationaler und internationaler Ebene entwickelt werden müssen, die in ihrer Dimension bisher höchstens angedacht worden sind,
- ein weitgehender Konsens angestrebt werden soll,
- ein diskursiver Arbeitsstil von Projektleitern, Einzelstudien bearbeitenden Instituten und Kommission angestrebt wird,
- das hier in zusammenfassender Darstellung vorgelegte Studienprogramm ein erster Schritt zur Erfassung des Sachstands und der Erarbeitung von ersten „robusten“ Maßnahmen sein soll, die sich auf jeden Fall als zwingend richtig erweisen, damit erste konkrete Maßnahmenvorschläge auf diesem schwierigen und äußerst komplexen Arbeitsfeld bereits im Jahr 1990 vorliegen und damit die Möglichkeit eröffnet wird, diese noch in der laufenden Wahlperiode zu verabschieden und parallel zu diesem Studienprogramm für einen zweiten Schritt weitergehenden notwendig werdenden Forschungs- und Handlungsbedarf zu skizzieren.

In diesem Sinn bedeutet dieses Studienprogramm, daß der Deutsche Bundestag mit Hilfe der in der Bundesrepublik Deutschland repräsentativ vorhandenen Fachwissenschaft – unter Einbeziehung einiger Schweizer Wissenschaftler – in einem ersten ungewöhnlichen Schritt auf ein ungewöhnlich komplexes Problem angemessen reagiert.

Gleichzeitig bedeutet die Einbindung vieler relevanter Institute und Wissenschaftler der Bundesrepublik Deutschland, daß viele auf dem Energiesektor arbeitenden Institute in ihre Arbeit und Überlegungen die Problematik des Treibhauseffektes und Möglichkeiten zur Reduzierung des erkannten Gefahrenpotentials einfließen lassen und das energiewirtschaftliche sowie energietechnische Denkpotehtial der Bundesrepublik Deutschland aufgrund einer schnellen energiepolitischen Weichenstellung Fragen unter ökologischen Vorzeichen betrachtet und dadurch heute

kaum absehbare Vorschläge und Lösungsstrategien in der weiteren Zukunft erarbeitet werden.

Abschnitt E gibt eine erste Auswertung der Ergebnisse dieser Studien wieder. Detailliertere Umsetzungsmaßnahmen, mit denen die im ersten Kapitel dargestellten Reduktionsziele bis zum Jahr 2005 erreicht werden sollen, müssen in den einzelnen Energiesektoren und -bereichen – auch unter Berücksichtigung der Einbeziehung der anderen Energieträgerstruktur und Ausgangslage der Energiesituation des Gebietes der ehemaligen DDR in diesem Zeitraum – noch entwickelt werden.

Im Zusammenhang mit dem Auftrag an 50 wissenschaftliche Institute und dem Ziel, in einem möglichst diskursiven Prozeß von Wissenschaft und Politik die Möglichkeiten und Erfordernisse für geeignete Maßnahmen im Energiebereich zu erarbeiten, weist die Kommission auf folgenden bedeutsamen Punkt hin:

Die Enquete-Kommission ist sich darüber im klaren, daß die aus dem zusätzlichen Treibhauseffekt resultierenden Gefahren nur abgewendet werden können, wenn die Politik das ihr durch die Demokratie gegebene Primat wahrnimmt. Ziel aller Politik und insbesondere der Politik zur Eindämmung des Treibhauseffektes muß es sein, den Fortbestand der Zivilisation ökologisch und ökonomisch dauerhaft und menschenwürdig zu sichern. Bei einem so schwierigen Gebiet wie dem der Energiepolitik ergibt sich dabei für die Kommission die Aufgabe, durch ein diskursives Verfahren der Entscheidungsbildung sowohl politische Gemeinsamkeiten wie auch sachliche Unterschiede herauszuarbeiten und die gegenwärtig gemeinsamen und unterschiedlichen Standpunkte transparent zu machen. Dieses Verfahren ist Voraussetzung für demokratisch legitimates, ökologisch notwendiges und gesellschaftlich akzeptiertes Handeln – unverzichtbare Grundbedingung für politische Handlungsfähigkeit, die gerade für die Umsetzung einer wirksamen Politik zur Eindämmung des Treibhauseffektes notwendig ist.

Mit dieser diskursiven Methode der Willensbildung kann aufgezeigt werden, wo einerseits Konsens für eine Politik zum Schutz der Erdatmosphäre – und hier insbesondere in bezug auf die Energiepolitik – besteht und wo andererseits die Diskussion fortgeführt und vertieft werden muß. Dazu ist es erforderlich, die unterschiedlichen Handlungsmöglichkeiten gleichberechtigt aufzuzeigen.

Die Kommission teilt dabei die Auffassung der sozialwissenschaftlichen Forschung, daß die Entwicklung von Technik auch ein sozial bestimmter Prozeß ist, in den unterschiedliche Interessen, Akzeptanzfragen und kulturelle Werthaltungen einfließen. Zudem sind bei der Bewertung der einzelnen Technikpfade die gesellschaftlichen Risiken zu berücksichtigen.

Dem Abschnitt E liegen die ersten Ergebnisse des Studienprogramms der Enquete-Kommission zugrunde. Wegen der knappen Zeit wurde das Studienprogramm so angelegt, daß die meisten Einzelstudien – im wesentlichen auf der Grundlage vorhandener Daten und Untersuchungen – innerhalb von sechs bis neun Monaten vorgelegt werden mußten. Koordiniert wurden die Arbeiten in den einzelnen Studienkom-

plexen von Projektleitern, die der Kommission sowohl im Rahmen der Vorbereitung und Durchführung des Programms als auch nach Vorlage der Einzelstudien für die Zusammenfassung der Ergebnisse der Studienkomplexe und als Diskussionspartner zur Verfügung standen. Nach Vorlage der Einzelstudien erstellten sie Zusammenfassungen der einzelnen Projektbereiche für die Kommissionsberatungen.

Die insgesamt rund 150 Studien wurden auf rund 50 wissenschaftliche Institute aufgeteilt und mußten wegen der Terminlage zeitlich weitgehend parallel durchgeführt werden. Wechselwirkungen zwischen den einzelnen Bereichen konnte daher die Einzelstudien nur begrenzt berücksichtigen.

Die Bearbeiter der Studien haben sich zwar weitgehend an einem gemeinsamen Analyseraster orientiert, das im 4. Kapitel in Kurzform wiedergegeben ist, trotzdem war es aus Zeitgründen nicht möglich, alle den Studien zugrundegelegten Annahmen zu vereinheitlichen, die Einzelstudien wechselseitig aufeinander zu beziehen und ein im Rahmen der 150 Einzelstudien völlig konsistentes Bild zu entwerfen.

Um Wechselwirkungen zwischen den einzelnen Bereichen zu erfassen, addierbare Reduktionspotentiale zu erhalten und zu einem Gesamtbild zu gelangen, beauftragte die Kommission sechs Wissenschaftler mit der Erstellung einer auf den Studienkomplexen A.1 bis A.6 aufbauenden, integrierenden Energiestudie. Diese zusammenfassende Energiestudie diente der Kommission als Basis für die Kapitel 3, 4 und 5.

Einen Überblick über die Studien und die beauftragten Institute enthält das 6. Kapitel.

In einem weiteren, in Zukunft zu leistenden Schritt wird es notwendig sein, aus der Vielzahl der im gesamten Studienprogramm dargelegten Daten und Informationen wirksame Umsetzungsmaßnahmen für die einzelnen Bereiche und Sektoren im Detail zu erarbeiten. In diesem Zusammenhang ist auch auf das 1. Kapitel zu verweisen, das Ergebnisse, gemeinsam getragene Handlungsempfehlungen und weiteren Forschungsbedarf zusammenstellt, der bei der Bearbeitung der Studien sichtbar geworden ist. Die Notwendigkeit für weitergehende, zukünftig zu erarbeitende Studien darf allerdings nicht dazu verleiten, mit dem Handeln zu warten. Statt dessen muß – eingedenk der unbestrittenen Bedeutung weiterer Forschung – umgehend mit der Umsetzung der notwendigen Handlungsempfehlungen begonnen werden.

Für die Enquete-Kommission ergibt sich aus den bisherigen Arbeitsergebnissen die Notwendigkeit, die heutige Energieversorgung angesichts der durch den Treibhauseffekt bedingten Herausforderung grundlegend zu modernisieren. Dabei zeichnet sich ab, daß die durch den Treibhauseffekt aufgeworfenen Probleme so tiefgehend sind, daß in der Struktur der Energieversorgung gravierende Änderungen vorgenommen werden müssen.

Wichtig war es daher zunächst, die nach dem heutigen Wissensstand möglichen technisch-wirtschaftlichen Potentiale zur Verminderung des Energieeinsatzes beziehungsweise zur Reduktion der Emission energiebedingter klimarelevanter Spurengase für die Bundesrepublik Deutschland zu analysieren.

Insbesondere war dabei im Studienprogramm zu prüfen, welchen Beitrag

- Energieeinsparung durch rationellere Energieverwendung sowie energiebewußtes Verhalten und Verminderung der Energiedienstleistung (Studienkomplex A.1),
- die Nutzung der erneuerbaren Energiequellen (Studienkomplex A.2),
- der Austausch fossiler Energieträger untereinander (Studienkomplex A.3),
- die Nutzung der Kernenergie (Studienkomplex A.4),
- Energiespeicher, neue Sekundärenergieträger und Nutzungssysteme, Entsorgungsmöglichkeiten von CO<sub>2</sub> sowie Möglichkeiten der Emissionsminderung anderer Spurengase (Studienkomplex A.5) und
- die Fortentwicklung des Verkehrsbereichs (Studienkomplex A.6)

leisten können.

- Um das bisherige Wissen verfügbar zu machen, war ferner eine Analyse weltweiter Energiebedarfs- und Reduktionsszenarien für Kohlendioxid und andere energiebedingte klimarelevante Spurengase notwendig (Studienkomplex B).
- Zur Erarbeitung einer detaillierten Gesamtstrategie in diesem Politikbereich mußten ferner weiterer Forschungsbedarf beziehungsweise die Rahmenbedingungen und Kriterien für langfristige Untersuchungen zur Bewertung von Reduktionspotentialen und Strategien zur Vermeidung und Reduktion energiebedingter klimarelevanter Spurengase erarbeitet werden (Studienkomplex C).
- Um die Dringlichkeit und die Intensität notwendiger Maßnahmen fundierter abschätzen zu können, war außerdem ein Referenzszenario des Energiebedarfs und der Emissionen energiebedingter klimarelevanter Spurengase für die Bundesrepublik Deutschland ohne Berücksichtigung wesentlicher Eingriffe aufgrund des zusätzlichen Treibhauseffektes notwendig (Studienkomplex D).
- Darüber hinaus wurden Untersuchungen über die Ausgestaltung einer „Internationalen Konvention zum Schutz der Erdatmosphäre“ (Studienkomplex E) sowie
- Handlungsmöglichkeiten, Wirkungsanalysen energiepolitischer Instrumente und Maßnahmenbündel in Auftrag gegeben (Studienkomplex F), damit im Rahmen der sich immer schneller entwickelnden nationalen und internationalen Diskussion über mögliche Maßnahmen seitens der Bundesrepublik Deutschland fundiertere Vorschläge eingebracht werden können.

Im folgenden werden eine Zusammenfassung und erste wesentliche Ergebnisse des Studienprogramms dargestellt. Dabei hat es sich als zweckmäßig herausgestellt, verschiedene Handlungsmöglichkeiten zu vergleichen. Die zu diesem Zusammenhang ermittelten unterschiedlichen Szenarien enthalten als Vor-

gabe an die Auftragnehmer unterschiedliche Reduktions-Beiträge in den einzelnen Bereichen wegen verschiedener Varianten der Nutzung der Kernenergie bis zum Jahr 2005 (vgl. 1. und 5. Kapitel):

- eines Szenarios mit Beibehaltung der heutigen Kapazität der Kernenergie, (Reduktionsszenario „Energiepolitik“)
- eines Reduktionsszenarios mit einem Ausstieg aus der Nutzung der Kernenergie und
- eines Reduktionsszenarios mit einem Ausbau der Kernenergie.

Die Kommission trägt damit den unterschiedlichen, in der öffentlichen Diskussion befindlichen Standpunkten zur Nutzung der Kernenergie Rechnung und stellt in Abhängigkeit von diesen Vorgaben die Aufteilung der Reduktionsanteile der verschiedenen Sektoren und Bereiche zur Diskussion, die zum Erreichen der Zielvorgabe von 30 Prozent CO<sub>2</sub>-Reduktion bis zum Jahr 2005 geboten sind.

Die Kommission wiederholt in diesem Zusammenhang die bereits im ersten Bericht getroffene Feststellung, daß bei allen Überlegungen zur Reduktion der Emissionen energiebedingter klimarelevanter Spurengase der Energieeinsparung, der rationellen Nutzung und Umwandlung von Energie sowie der stärkeren Nutzung der erneuerbaren Energien Priorität zukommt.

Die im 3., 4. und 5. Kapitel wiedergegebenen Reduktionspotentiale bis zum Jahr 2005 und Handlungsmöglichkeiten in Richtung auf eine Energieversorgung, die zur Eindämmung des zusätzlichen Treibhauseffektes beiträgt, basieren im wesentlichen auf

der von den sechs beauftragten Wissenschaftlern (vgl. 6. Kapitel) erstellten zusammenfassenden Energiestudie. Diese Studie wiederum basiert auf den Ergebnissen der Studienkomplexe A.1 bis A.6 des Studienprogramms, wobei intensive Beratungen und Abstimmungen stattfanden zwischen Bearbeitern und Kommission im Hinblick auf die Zusammenfassung der einzelnen Studienkomplexe, die zielorientierte Ausrichtung der Szenarien (30 Prozent Reduktion der CO<sub>2</sub>-Emissionen bis zum Jahr 2005 bei allen drei Reduktionsszenarien) sowie die Ermittlung der Handlungsmöglichkeiten in den drei zielorientierten Szenarien.

Die folgenden Kapitel 3 bis 5 haben einen anderen Charakter als die anderen Kapitel dieses Berichts. Sie stellen den Versuch dar, auf einem sehr komplexen Gebiet und vor dem Hintergrund zum Teil kontrovers geführter Diskussionen die Ergebnisse einer Vielzahl von Studien in Kurzform darzustellen, ohne daß sich die gesamte Kommission oder jeder der sechs Bearbeiter der zusammenfassenden Energiestudie im einzelnen mit allen Aussagen identifizieren.

Dieses von der Kommission gewählte Verfahren gewährleistet einen sachlichen und diskursiven Arbeitsstil. Die gemeinsam von der Kommission getragenen Ergebnisse und gemeinsam befürworteten Handlungsempfehlungen sind im 1. Kapitel sowie in Abschnitt A wiedergegeben. Darüber hinausgehende ergänzende und nicht von der gesamten Kommission einvernehmlich befürwortete oder kontroverse Aussagen und Empfehlungen sind nach Nr. 5 des 4. Kapitels sowie am Schluß des Abschnittes E wiedergegeben.

### 3. Energiewirtschaftliche Begriffe, Energieeinheiten und Umrechnungsfaktoren

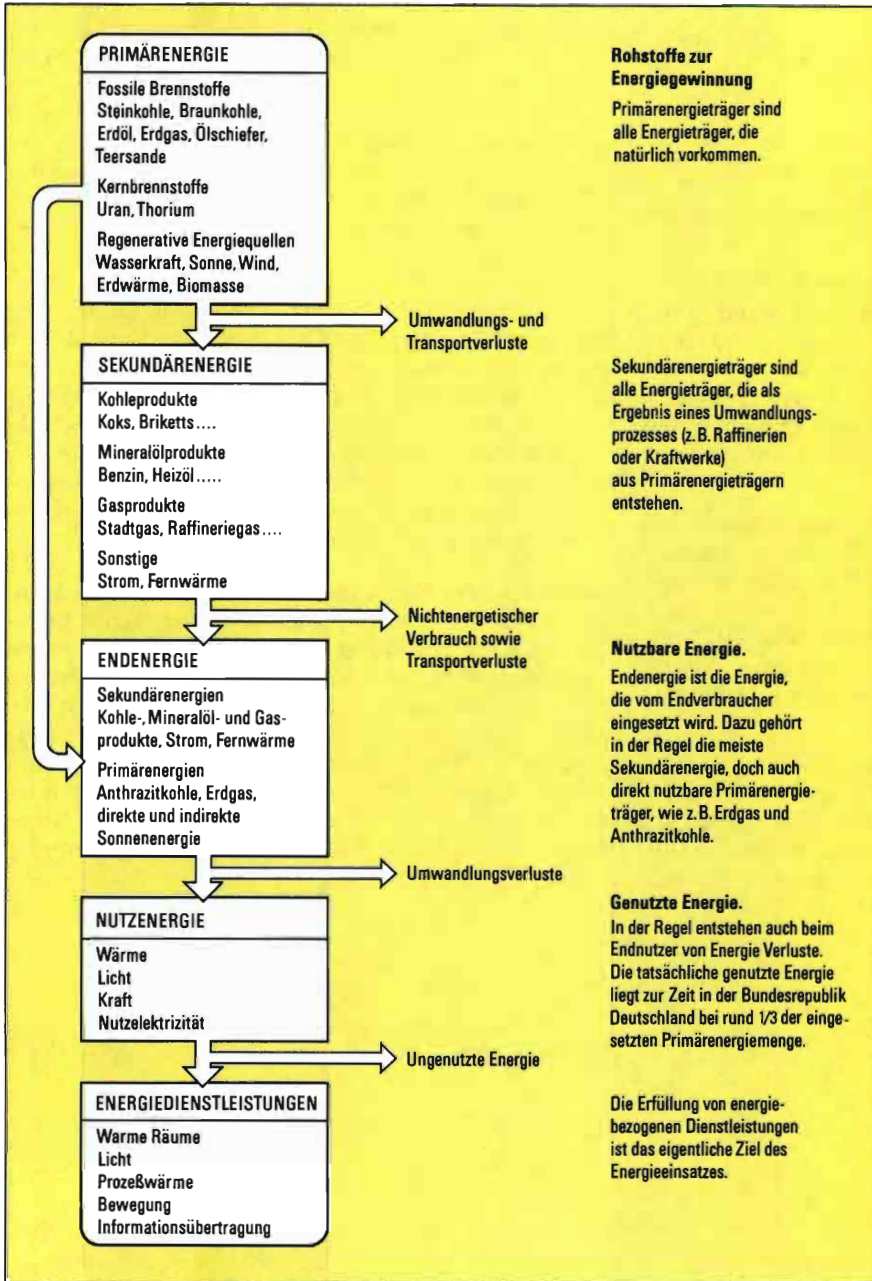


Abb. 3: Die energiewirtschaftlichen Begriffe Primärenergie, Sekundärenergie, Endenergie, Nutzenergie und Energiedienstleistung



**Energieeinheiten, Vorsätze, Vorsatzzeichen und Umrechnungsfaktoren****verbindliche Einheit:** Joule (J)<sup>1)</sup>

1 Joule (J) = 1 Newtonmeter (Nm) = 1 Wattsekunde (Ws)

**gebräuchliche Energieeinheiten:**

1 Terawattstunde	= 1 TWh	= 1 × 10 <sup>9</sup> kWh = 3,6 PJ
1 Terawattstunde	= 1 TWh	= 0,123 Mio. t SKE
1 Million Tonnen Steinkohleneinheiten	= 1 Mio. t SKE	= 29,308 PJ
		= 8,15 TWh
1 Exajoule	= 1 EJ	= 278 TWh

**Vorsätze und Vorsatzzeichen:**

Kilo	k	10 <sup>3</sup> Tausend	Tera	T	10 <sup>12</sup> Billion
Mega	M	10 <sup>6</sup> Million	Peta	P	10 <sup>15</sup> Billiarde
Giga	G	10 <sup>9</sup> Milliarde	Exa	E	10 <sup>18</sup> Trillion

**Umrechnungsfaktoren:**

Einheit	kJ	kWh	kg SKE
1 kJ	—	0,000 278	0,000 034
1 kWh	3 600	—	0,123
1 kg SKE	29 308	8,14	—

<sup>1)</sup> Für die Bundesrepublik Deutschland gilt ab 1. Januar 1978 als gesetzliche Einheit für Energie verbindlich das Joule. Die Kalorie (cal) und davon abgeleitete Einheiten wie Steinkohleeinheiten (SKE) und Rohöleinheiten (RÖE) (1 SKE = 0,7 RÖE) können für eine Übergangszeit nur noch hilfsweise zusätzlich verwendet werden.

**4. Tabellenverzeichnis**

- Tab. 1: Prozentuale Anteile der Treibhausgase weltweit am zusätzlichen Treibhauseffekt, bezogen auf ihre Konzentration
- Tab. 2: Derzeitige Anteile der verschiedenen Verursacherbereiche weltweit am zusätzlichen, anthropogen bedingten Treibhauseffekt
- Tab. 3: Energiebedingte CO<sub>2</sub>-Emissionen, Anteile an den weltweiten CO<sub>2</sub>-Emissionen und CO<sub>2</sub>-Emissionen pro Kopf für das Jahr 1986 für die größten Emittenten
- Tab. 4: Energieeinheiten, Vorsätze, Vorsatzzeichen und Umrechnungsfaktoren

**5. Abbildungsverzeichnis**

- Abb. 1: Energiebedingte CO<sub>2</sub>-Emissionen der größten Emittenten und Emissionen pro Kopf im Jahr 1986 in Millionen Tonnen bzw. in Tonnen CO<sub>2</sub> per capita
- Abb. 2: Energiebedingte CO<sub>2</sub>-Emissionen der EG-Mitgliedstaaten und der EG insgesamt, in Millionen Tonnen CO<sub>2</sub> und in Tonnen CO<sub>2</sub> pro Kopf im Jahr 1986
- Abb. 3: Die energiewirtschaftlichen Begriffe Primärenergie, Sekundärenergie, Endenergie, Nutzenergie und Energiedienstleistung

## 3. KAPITEL

Die Rolle der Energieversorgung an den Emissionen klimarelevanter Schadstoffe<sup>1)</sup>

## 1. Die weltweite Situation

Als Treibhausgase werden die Gase in der Atmosphäre bezeichnet, die ihre wesentlichen Absorptionsbanden im Wellenlängenbereich der Wärmestrahlung, im Infrarotbereich, aufweisen, die also bei Anstieg ihrer Konzentrationen den Treibhauseffekt der Atmosphäre verstärken und damit eine Erhöhung der Temperatur an der Erdoberfläche bewirken können. Die wichtigsten Treibhausgase sind Wasserdampf, Kohlendioxid, Methan, Distickstoffoxid, die Fluorchlorkohlenwasserstoffe und Ozon. Die Treibhausgase aus allen Quellen tragen nach dem gegenwärtigen Kenntnisstand mit folgenden Beiträgen zum durch Menschen verursachten (anthropogenen) Treibhauseffekt bei: das Kohlendioxid (CO<sub>2</sub>) mit 50 Prozent, das Methan (CH<sub>4</sub>) mit 13 Prozent, die Fluorchlorkohlenwasserstoffe (FCKW) mit 22 Prozent, das Distickstoffoxid (N<sub>2</sub>O) mit 5 Prozent, Ozon der Troposphäre und unteren Stratosphäre (O<sub>3</sub>) wird mit 7 Prozent angegeben und der von Wasserdampf in der Stratosphäre (H<sub>2</sub>O) mit 3 Prozent (vgl. Abschnitt A und C).

Durch die für die Energienutzung relevanten Techniken und Maßnahmen werden hiervon das Ozon, das Distickstoffoxid, das Kohlendioxid und das Methan beeinflusst. Die derzeitige Konzentration von Ozon in der Troposphäre wird mit 10 bis 30 ppbv angegeben (geschätzter Mittelwert etwa 20 ppbv). Aufgrund der kurzen Lebensdauer von Ozonmolekülen sind die troposphärischen Ozonkonzentrationen sehr starken räumlichen und zeitlichen Schwankungen unterworfen. In Perioden photochemischen Smogs können regional 200 ppbv überschritten werden. Die bodennahe Ozonkonzentration weist einen ausgeprägten Tages- und Jahresgang auf. In den mittleren Breiten der Nordhemisphäre treten in den Mittagsstunden während der Sommermonate die höchsten Konzentrationen auf. Der jährliche Anstieg der Konzentration von troposphärischem Ozon wird mit ungefähr 0,5 Prozent angegeben. Verursacht werden diese hohen Ozon-Konzentrationen in der Troposphäre nicht zuletzt durch die Freisetzung von sogenannten „Vorläuferstoffen“, unter anderem auch aus anthropogenen Quellen. Zu diesen Vorläuferstoffen zählen insbesondere Kohlenmonoxid (CO), Stickoxide (NO<sub>x</sub>) und eine Vielzahl von flüchtigen organischen Verbindungen (VOC). Wegen seiner besonderen Bedeutung wird Methan hier gesondert behandelt. Zur Vermeidung von Fehlinterpretationen werden die übrigen flüchtigen organischen Verbindungen ohne Methan mit NMVOC bezeichnet.

Kohlenmonoxid (CO) wird über eine komplizierte Reaktionskette beim photochemischen Abbau des Methans und anderer höherer Kohlenwasserstoffe gebildet, bei der unvollständigen Verbrennung, insbesondere in Kraftfahrzeugen, bei Wald- und Steppenbränden sowie bei der Verbrennung von Biomasse wie etwa Holz und landwirtschaftlichen Abfallstoffen. Stickoxid-Quellen (NO<sub>x</sub>) für die Troposphäre sind mikrobiologische Prozesse im Boden (Denitrifikation), Biomasseverbrennung und Verbrennung von fossilen Brennstoffen. Außerdem entsteht NO<sub>x</sub> durch Blitzentladungen. In der nördlichen Hemisphäre stammt NO<sub>x</sub> jedoch vorwiegend aus anthropogenen Quellen. Besonders die Abgase von Kraftfahrzeugen führen in Ballungsgebieten zu sehr hohen NO<sub>x</sub>-Mischungsverhältnissen, die sich nicht nur regional, sondern auch global auswirken. Das Distickstoffmonoxid (N<sub>2</sub>O) ist unter den Bedingungen in der Troposphäre zwar äußerst stabil und trägt dort nicht zur Ozonbildung bei. Aufgrund der Absorption von Infrarot-Strahlung (IR) sowie des Abbaus in der Stratosphäre unter Bildung von ozonzerstörenden NO<sub>x</sub>-Radikalen beeinflussen diese Moleküle dennoch die klimatischen Verhältnisse. Nach den bisherigen Einschätzungen trägt das N<sub>2</sub>O bei einer mittleren Konzentration von 310 ppbv zu etwa 5 Prozent zum derzeitigen Treibhauseffekt bei. Der jährliche Konzentrationsanstieg wird mit 0,2 bis 0,3 Prozent abgeschätzt. Natürliche Hauptquelle des N<sub>2</sub>O ist die mikrobiologische Denitrifikation und Nitrifikation in natürlichen Böden, wobei denitrifizierende Bakterien Nitrat und nitrifizierende Bakterien Ammoniak teilweise umwandeln. Eine wesentliche anthropogene Quelle ist die Verwendung stickstoffhaltiger Dünger in der Landwirtschaft.

CO<sub>2</sub> trägt zum Treibhauseffekt im wesentlichen durch seine Absorptionsbande bei 15 Nanometer bei. Nach dem gegenwärtigen Kenntnisstand hat die atmosphärische CO<sub>2</sub>-Konzentration zwischen etwa 180 und 200 ppmv in den Eiszeiten und etwa 280 und 300 ppmv in den Warmzeiten geschwankt. Ihr vorindustrieller Wert (etwa im Jahr 1800) liegt bei 280 ppmv. Seitdem ist sie ständig angestiegen, im Jahr 1958 hatte die CO<sub>2</sub>-Konzentration bereits 315 ppmv erreicht und steigt seitdem in der gesamten Atmosphäre annähernd gleichförmig um etwa 0,4 Prozent pro Jahr an. Im Jahr 1987 betrug sie 348 ppm. Die natürlichen Quellen des CO<sub>2</sub> sind die Pflanzenatmung, die mikrobielle Zersetzung des organischen Materials im Boden, Gesteinsverwitterung und die Freisetzung aus dem Ozean. Nur 4 Prozent des jährlich emittierten CO<sub>2</sub> sind anthropogenen Ursprungs. Hierbei handelt es sich zu rund 80 Prozent um die Verbrennung fossiler Energieträger und zu rund 20 Prozent um die Emissionen von CO<sub>2</sub> durch die Zerstörung der tropischen Wälder beziehungsweise Landnutzungsänderungen (vgl. Abschnitt C).

<sup>1)</sup> Dieser Teil wurde im Rahmen der zusammenfassenden Energiestudie (vgl. Kapitel 6) von Prof. Dr. Voß federführend bearbeitet.

Weltweit werden derzeit energiebedingt etwa 20 Milliarden Tonnen CO<sub>2</sub> und 110 Millionen Tonnen Methan (einschließlich Depiniegas) emittiert. Den größten Anteil der CO<sub>2</sub>-Emissionen haben hierbei mit über 50 Prozent die westlichen Industrieländer und hier wiederum mit 50 Prozent die Vereinigten Staaten. In den Staatshandelsländern werden energiebedingt etwa 5,4 Millionen Tonnen CO<sub>2</sub> freigesetzt (27 Prozent), während die Entwicklungsländer nur einen Anteil von rund 20 Prozent haben. Bedeutsam ist hierbei, daß in der Gruppe der Entwicklungsländer fast zwei Drittel der CO<sub>2</sub>-Emissionen auf nur zwei Länder, China und Indien, entfallen (vgl. Tab. 1 und 2. Kapitel, Tab. 3).

Tabelle 1

**Derzeitige energiebedingte weltweite CO<sub>2</sub>- und Methan-Emissionen**

Region	CO <sub>2</sub> (Mio. t)	Methan (Mio. t)
OECD .....	10 900	
<i>davon</i>		
USA .....	5 500	
EG .....	3 000	
Japan .....	1 000	
Bundesrepublik Deutschland .....	715	
Entwicklungsländer ...	3 800	
<i>davon</i>		
China .....	1 800	
Indien .....	500	
RGW-Länder .....	5 400	
<i>davon</i>		
UdSSR .....	3 700	
DDR .....	370	
Welt .....	20 100	111 <sup>1)</sup>

<sup>1)</sup> einschließlich Deponiegas

Über die regionale Verteilung der Methan-Emissionen liegen nur rudimentäre Schätzungen vor. Bereits die Globalziffer von rund 110 Millionen Tonnen aus dem Energiebereich (einschließlich Deponien) kann nur als grobe Schätzung angesehen werden.

Ist schon die weltweite regionale Verteilung der CO<sub>2</sub>-Emissionen äußerst ungleichgewichtig, so zeigen sich noch krassere Unterschiede in der Struktur der Bestimmungsfaktoren für die Emissionen (vgl. Tab. 2).

Die Regionen lassen sich wie folgt charakterisieren:

Westliche Industrieländer: Niedriger Bevölkerungsanteil (16 Prozent), sehr hohes Produktions- und Einkommensniveau, relativ niedrige Energieintensität und relativ hohe Effizienz der Energienutzung.

Entwicklungsländer: Sehr hoher Bevölkerungsanteil (76 Prozent), niedrigstes Produktions- und Einkommensniveau, niedrige Effizienz der Energienutzung.

Staatshandelsländer: Niedrigster Bevölkerungsanteil (8 Prozent), niedriges Produktions- und Einkommensniveau bei sehr schlechter Effizienz der Energienutzung (vgl. Tab. 2).

Die weitere langfristige Entwicklung der weltweiten CO<sub>2</sub>-Emissionen ist in den vergangenen Jahren in mehreren Szenarien untersucht worden. Die Auswertung dieser Szenarien im Rahmen des Studienprogramms der Enquete-Kommission ergibt folgendes Bild: Unumstritten und übereinstimmend gehen alle Szenarien von einem beträchtlichen weltweiten Bevölkerungswachstum von heute etwa 5,3 Milliarden Menschen auf etwa 6,8 Milliarden im Jahr 2005 (davon Entwicklungsländer 5,5 Milliarden) und 9 bis 10 Milliarden im Jahr 2050 aus. Ebenso wird ein weiteres Wirtschaftswachstum angenommen, wobei die Wachstumsraten der Entwicklungsländer am höchsten angesetzt werden (Unterstellung eines zumindest marginalen Anstiegs des Pro-Kopf-Einkommens für die Entwicklungsländer). Im Sinne einer Status quo-Projektion gehen die meisten Untersuchungen für die Energieintensität der Produktion in den einzelnen Regionen der Welt davon aus, daß in den westlichen Industrieländern die Energieintensität abnehmen wird (bis 2005 etwa 25 Prozent). In den Staatshandelsländern wird zwar auch eine Abnahme unterstellt (bis 2005 ca. 10 Prozent), dennoch bleibt die Energiedichte im weltweiten Vergleich extrem hoch. Für die Entwicklungsländer wird dagegen bei dem angenommenen Aufbau der industriellen Produktionstätigkeit und dem damit korrespondierenden Einkommenszuwachs eine Erhöhung der Energieintensität im Status quo unvermeidlich sein. Status quo heißt hier, daß keine deutlich verstärkten Anstrengungen zur Erhöhung der Energieeffizienz der zur Anwendung kommenden Produktionsprozesse und Technologien in den Entwicklungsländern initiiert und finanziert werden.

Tabelle 2

**Kennziffern der Bestimmungsgrößen für die derzeitigen CO<sub>2</sub>-Emissionen**

	OECD	Entwicklungsländer	RGW-Staaten
Bevölkerungsanteil (%) .....	16,2	76,0	7,8
BIP-Anteil (%) .....	74,3	18,6	7,1
Primärenergie/Kopf (GJ) .....	199	14	190
Primärenergie/BIP (MJ/\$ 1985) .....	17,5	35,0	30,8

Im Status quo-Fall (im eben definierten Sinne) ist im Ergebnis zukünftig noch mit einem erheblichen Anstieg der weltweiten energiebedingten CO<sub>2</sub>-Emissionen zu rechnen. Die Auswertung der Langfristszenarien kommt hier für das Jahr 2005 auf einen näherungsweise gemittelten Zuwachswert von etwa 40 Prozent. In keiner großen Region der Welt wird dabei mit einem Rückgang der CO<sub>2</sub>-Emissionen gerechnet.

Tabelle 3

### Szenarien zur weltweiten CO<sub>2</sub>-Emissionsentwicklung bis 2005 in Mrd. t

Region	1985/87	2005	Veränderung in %
OECD .....	10,9	13,4	23
<i>davon</i>			
USA .....	5,5	6,7	22
EG .....	3,0	3,3	10
Japan .....	1,0	1,2	20
Bundesrepublik Deutschland (ohne ehemalige DDR)	0,7	0,7	-4
Entwicklungsländer	3,8	8,0	111
<i>davon</i>			
China .....	1,8	4,3	139
Indien .....	0,5	1,3	160
RGW-Länder .....	5,4	6,9	28
Welt .....	20,1	28,3	41

## 2. Die Situation in der Bundesrepublik Deutschland (ohne ehemalige DDR)

Die Emissionssituation für das CO<sub>2</sub> in der Bundesrepublik Deutschland (ohne ehemalige DDR) ist in Abbildung 1 getrennt für die unterschiedlichen fossilen Energieträger und für die verschiedenen Emittentenbereiche für das Jahr 1987 aufgeführt. Wie aus Abbildung 1 zu ersehen ist, beliefen sich im Jahr 1987 die energiebedingten CO<sub>2</sub>-Emissionen auf eine Größenordnung von ca. 715 Millionen Tonnen CO<sub>2</sub> (einschl. 10 Millionen Tonnen CO<sub>2</sub> aus dem internationalen Luftverkehr). Damit trägt die Bundesrepublik Deutschland (ohne ehemalige DDR) zu 3,5 Prozent zu den weltweiten CO<sub>2</sub>-Emissionen in Höhe von rund 20,5 Milliarden Tonnen bei.

Hauptemittent in der Bundesrepublik Deutschland (ohne ehemalige DDR) war im Jahr 1987 die Stromerzeugung, auf die 231 Millionen Tonnen CO<sub>2</sub> oder 32 Prozent der Emissionen zurückzuführen waren. Daneben waren der Verkehr mit 20 Prozent sowie die Industrie und die Haushalte mit 16 beziehungsweise 18 Prozent an den energiebedingten Gesamtemissionen beteiligt.

Die Aufschlüsselung der CO<sub>2</sub>-Emissionen nach Energieträgern zeigt (vgl. Abb. 1), daß im Jahr 1987 ca.

26,1 Prozent auf die Verbrennung von Steinkohle, 23,3 Prozent auf leichtes Heizöl und Dieselmotortreibstoff, 17,5 Prozent auf die Gase, 13,9 Prozent auf Braunkohle und 14,1 Prozent auf die Verbrennung von Benzin entfielen. Das schwere Heizöl mit einem Beitrag von 4,4 Prozent sowie die sonstigen Energieträger (Müll u. a.) mit einem Beitrag von 0,7 Prozent waren im Jahr 1987 nur geringfügig an den Gesamtemissionen beteiligt.

Von den Spurengasen wird nach Kohlendioxid (CO<sub>2</sub>) und den FCKW dem Methan (CH<sub>4</sub>) in der Atmosphäre der dritthöchste Anteil am bisherigen anthropogenen Treibhauseffekt zugewiesen. Auf der anderen Seite ist Erdgas, das wiederum zu über 90 Prozent aus Methan besteht, derjenige fossile Energieträger, dessen auf die Energieeinheit bezogenen CO<sub>2</sub>-Emissionen am geringsten sind und der infolgedessen als potentiell günstigste kohlenstoffstämmige Austauschenergie für Substitutionsstrategien fossiler Energieträger untereinander anzusehen ist. Über die Methanemissionen, seien sie nun energiebedingt oder anderen anthropogenen beziehungsweise natürlichen Ursprungs, liegen derzeit weit weniger gesicherte Erkenntnisse vor als für das Kohlendioxid. Dies trifft auch für die direkten und indirekten Methanemissionen zu, die mit der Nutzung der verschiedenen fossilen Energieträger verbunden sind.

Die für die Sektoren Energie- und Abfallwirtschaft in der Bundesrepublik Deutschland (ohne ehemalige DDR) abgeschätzten jährlichen Methanemissionen sind in Abbildung 2 dargestellt. Unterschieden ist dabei zwischen den CH<sub>4</sub>-Emissionen, die bei der Verbrennung des fossilen Brennstoffs entstehen sowie denjenigen, die in den vorgelagerten Prozessen (zum Beispiel Gewinnung, Transport, Lagerung usw.) als Verlustemissionen anfallen. Von den gesamten der Energie- und Abfallwirtschaft zuzurechnenden CH<sub>4</sub>-Emissionen in Höhe von rund 2,6 Millionen Tonnen pro Jahr entfallen 95 Prozent auf die vorgelagerten Bereiche und nur 5 Prozent auf die Verbrennung selbst. Die höchsten Emissionen entfallen auf den Steinkohlebereich (Grubengas) mit einem Anteil von 44 Prozent, gefolgt vom Deponiebereich mit 31,5 Prozent. Nennenswerte CH<sub>4</sub>-Emissionen bei der Verbrennung (vgl. Abb. 3) treten im Emittentenbereich Verkehr auf, diese Emissionen machen mit insgesamt rund 73 000 Tonnen pro Jahr, aber lediglich 2,7 Prozent aller CH<sub>4</sub>-Emissionen aus.

Die Klimawirksamkeit des Methans, insbesondere sein Beitrag zum Treibhauseffekt durch Behinderung der Wärmerückstrahlung, wird in der Regel vereinfacht mit dem Index der CO<sub>2</sub>-Äquivalenz angegeben. Leitsubstanz ist demnach das Kohlendioxid. Die direkte Treibhaus-Klimawirksamkeit eines Mols CH<sub>4</sub> gegenüber derjenigen eines Mols CO<sub>2</sub> beträgt rund 21 (vgl. Abschnitt C).

Diese auf die Konzentration bezogene Klimarelevanz ist von der emissionsbezogenen Klimarelevanz zu unterscheiden, in die vor allem die durch die Methansenken beeinflusste Verweilzeit eines CH<sub>4</sub>-Moleküls in der Atmosphäre mit einfließt. Sie beträgt, wenn die Klimarelevanz über einen Zeitraum von 500 Jahren betrachtet wird, 3,3, das heißt, daß die Wirkung von 1 Mol zusätzlich in der Atmosphäre emittierten CH<sub>4</sub>

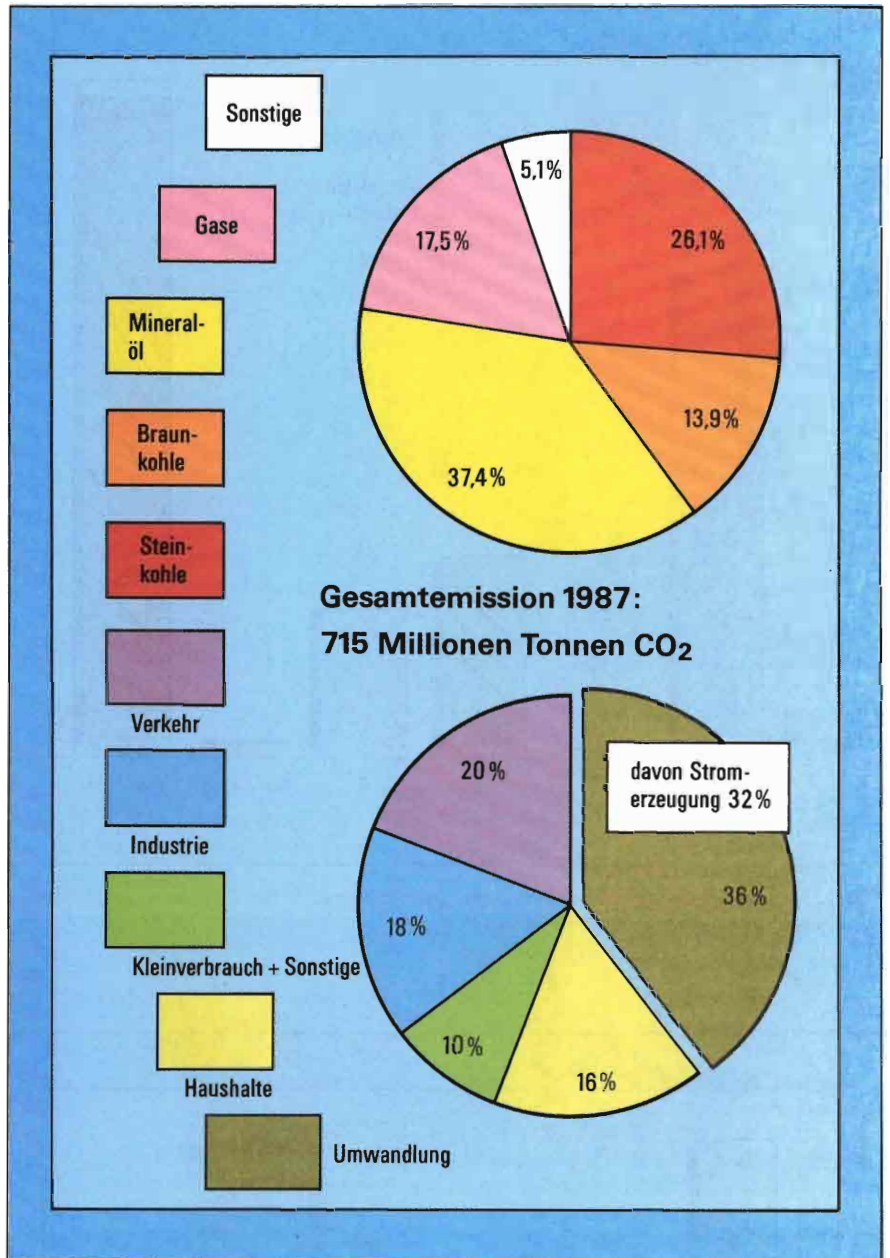


Abb. 1: Energiebedingte CO<sub>2</sub>-Emissionen der Bundesrepublik Deutschland (ohne ehemalige DDR) im Jahr 1987 (Bilanzierung der Industrie-Eigenstromerzeugung bei der Stromerzeugung und nicht bei der Industrie)

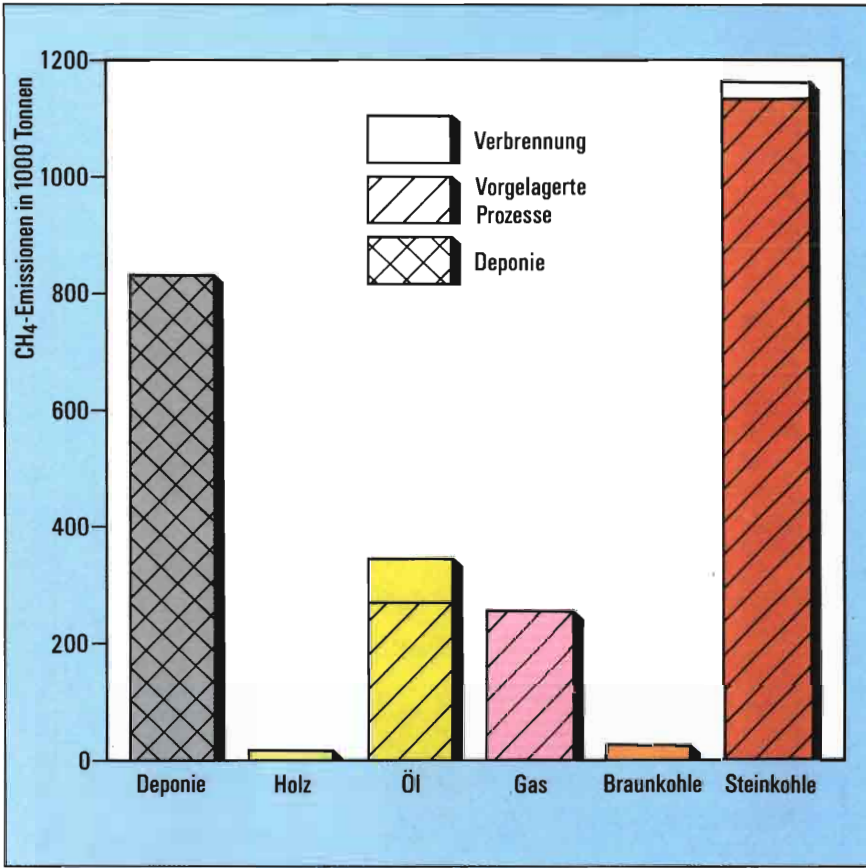


Abb. 2: Methan-Emissionen aus dem Energie- und Abfallbereich der Bundesrepublik Deutschland (ohne ehemalige DDR)

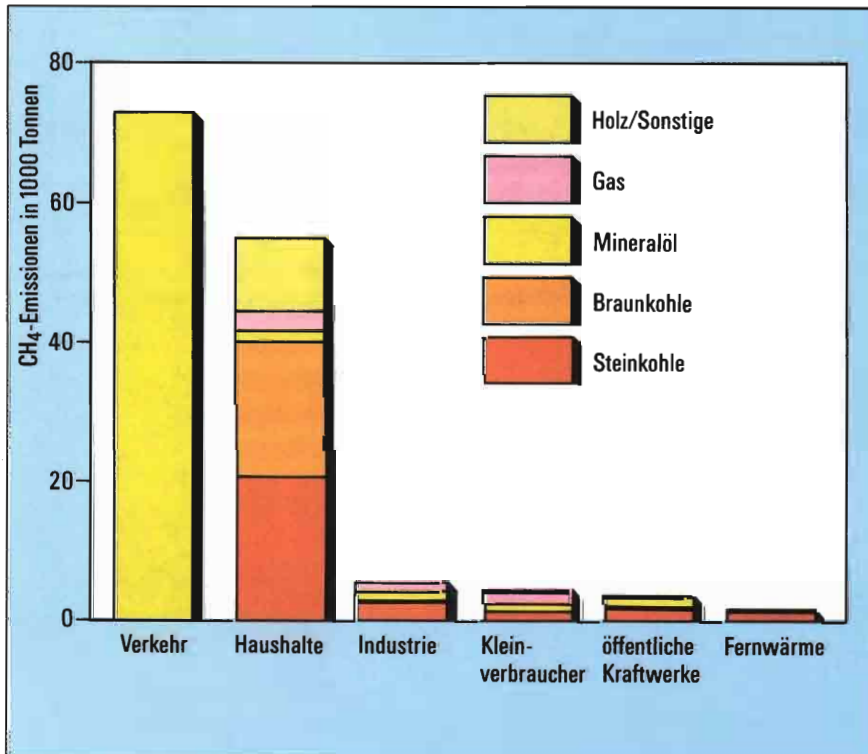


Abb. 3: Methan-Emissionen aus Verbrennung nach Emittentenbereichen und Energieträgern (in Abb. 2 schraffierter Bereich) der Bundesrepublik Deutschland (ohne ehemalige DDR)

Tabelle 4

**Spezifische Emissionsfaktoren von fossilen Energieträgern für CO<sub>2</sub> und CH<sub>4</sub> in kg CO<sub>2</sub> Äquivalent je GJ<sub>Input</sub>**

Brennstoff	CO <sub>2</sub> -Emissionsfaktor	CO <sub>2</sub> -Äquivalenzfaktor Klimawirksamkeit des Methans pro Mol	
		32	3,5
Braunkohle . . . . .	112	118,3	116,7
Steinkohle . . . . .	93	141,8	101,0
schweres Heizöl . . . . .	78	88,8	84,9
Leichtes Heizöl und Diesel . . . . .	73	84,3	80,4
Benzin . . . . .	71	82,3	78,4
Erdgas . . . . .	55	69,4	59,3

3,3 mal so groß ist wie 1 mol in die Atmosphäre emittiertem CO<sub>2</sub>. Der Wert ergibt sich hauptsächlich aus der um einen Faktor 10 geringeren Verweilzeit des CH<sub>4</sub> gegenüber dem CO<sub>2</sub> in der Atmosphäre. Hier fließen aber auch die indirekten Effekte des CH<sub>4</sub> ein, nämlich daß sich aus CH<sub>4</sub> sowohl CO<sub>2</sub> als auch Ozon in der Troposphäre und unteren Stratosphäre sowie Wasserdampf in der höheren Stratosphäre bildet. Die Klimarelevanz des Methans über kürzere Zeiträume hinweg ist größer. Über einen Zeitraum von 20 Jahren hinweg ist CH<sub>4</sub> bezogen auf das Volumen 23 mal so klimawirksam wie CO<sub>2</sub>, bezogen auf einen Zeitraum von 100 Jahren 7,6 mal so klimawirksam (vgl. dazu auch Abschnitt C).

Der um den Faktor 7 unterschiedlichen Klimawirksamkeit von CH<sub>4</sub> kommt eine gewisse Bedeutung für die Frage zu, inwieweit eine Substitution fossiler Energieträger zur Begrenzung des Treibhauseffektes beitragen kann. Auf die Auswirkungen der bestehenden Unsicherheit bezüglich der Klimawirksamkeit

Tabelle 5

**Treibhausgasemissionen verschiedener Emittentenbereiche in der Bundesrepublik Deutschland (ohne ehemalige DDR) im Jahr 1987**

(gerundet)

Emittentenbereich	CO <sub>2</sub>	CH <sub>4</sub>	CO	NMVOG	NO <sub>x</sub>	N <sub>2</sub> O
<b>1 Kraftwerke und Fernheizwerke</b>						
Emissionen in Mio. t/a . . . . .	207	0,004	0,04	0,01	0,48	0,03
Anteil in % . . . . .	28,8	0,2	0,6	0,3	18,5	35,6
<b>2 Verkehr</b>						
Emissionen in Mio. t/a . . . . .	141	0,073	5,80	1,32	1,61	0,01
Anteil in % . . . . .	19,7	2,8	79,4	86,3	62,0	8,0
<b>3 Industrie<sup>1)</sup></b>						
Emissionen in Mio. t/a . . . . .	156	0,006	0,10	0,01	0,31	0,02
Anteil in % . . . . .	21,9	0,2	1,3	0,9	11,8	26,0
<b>4 Kleinverbraucher</b>						
Emissionen in Mio. t/a . . . . .	63	0,005	0,16	0,01	0,05	0,01
Anteil in % . . . . .	8,9	0,2	2,1	0,5	1,9	10,2
<b>5 Haushalte</b>						
Emissionen in Mio. t/a . . . . .	113	0,054	1,02	0,05	0,09	0,01
Anteil in % . . . . .	15,8	2,1	14,0	3,3	3,5	17,9
<b>6 Sonstige</b>						
Emissionen in Mio. t/a . . . . .	35	2,487 <sup>2)</sup>	0,19	0,13	0,06	0,00
Anteil in % . . . . .	4,9	94,6	2,6	8,7	2,3	2,3
<b>7 Energienutzung</b>						
Emissionen in Mio. t/a . . . . .	715	2,629 <sup>2)</sup>	7,30	1,53	2,60	0,08
Anteil in % . . . . .	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0
Anteil an den Gesamtemissionen in % . . . . .	86,0		87,4	59,1	99,0	
<b>7 Anteil des Wärmemarktes</b> in Zeile 3, 4 und 5						
Emissionen in Mio. t/a . . . . .	248	0,062	1,18	0,06	0,34	0,04
Anteil in % . . . . .	34,6	2,4	16,2	3,8	12,9	52,2

<sup>1)</sup> inklusive Stromerzeugung von 57 TWh<sub>br</sub>/a

<sup>2)</sup> inklusive Deponien (830 kt/a) und vorgelagerter Emissionen

des CH<sub>4</sub> soll anhand einer überschlägigen Rechnung nachgegangen werden. Werden die CH<sub>4</sub>-Emissionen mit dem Faktor 23 beziehungsweise dem Faktor 3,3 auf CO<sub>2</sub>-Äquivalente umgerechnet, so ergeben sich ungefähr die in Tabelle 4 dargestellten spezifischen Emissionsfaktoren, die aber noch auf den alten Werten von 3,5 und 32 beruhen. Hieraus resultiert, daß eine Substitution C-reicher durch C-arme fossile Energieträger auch bei einer Mitbetrachtung der CH<sub>4</sub>-Emissionen unter Klimagesichtspunkten sinnvoll erscheint. Allerdings würden bei einem Klimawirkungsfaktor von 32 und auch 23, also über kurze Zeiträume, die äquivalenten CO<sub>2</sub>- und CH<sub>4</sub>-Emissionen der Steinkohle über denen der Braunkohle liegen.

Die Anteile der energiebedingten Emissionen der Treibhausgase CO<sub>2</sub>, CO, NMVOC, CH<sub>4</sub>, NO<sub>x</sub> und N<sub>2</sub>O an den Gesamtemissionen variieren entsprechend den spezifischen Bedingungen von Land zu Land, bewegen sich in vergleichbaren Ländern allerdings in ähnlicher Größenordnung. Die Emissionssituation für diese Spurenstoffe in der Bundesrepublik Deutschland (ohne ehemalige DDR) im Jahr 1987 ist in Tabelle 5 wiedergegeben. Die energiebedingten Emissionen der verschiedenen Schadstoffe sind getrennt für die verschiedenen Emittentenbereiche aufgeführt.

Wie aus der Tabelle 5 zu ersehen ist, sind bei den CO<sub>2</sub>-Emissionen die Kraft- und Fernheizwerke, die Industrie und der Verkehrssektor die Emittentenbereiche mit den größten Anteilen. Dagegen sind bei den CH<sub>4</sub>-Emissionen der Kohlebergbau und die Deponien die größten Emittentengruppen. Bei der Freisetzung der Schadstoffe CO, NMVOC und NO<sub>x</sub> kommt dem Verkehrssektor die größte Bedeutung zu. Als weitere, in Tabelle 5 nicht aufgeführte wichtige NMVOC-Quelle ist die Anwendung von Lösemitteln beziehungsweise lösemittelhaltigen Produkten zu nennen. Größere Mengen an NO<sub>x</sub> wurden im Jahr 1987 auch von Kraft- und Fernheizwerken freigesetzt. Die energiebedingten N<sub>2</sub>O-Emissionen scheinen dagegen, gemessen an den natürlichen und sonstigen anthropogenen N<sub>2</sub>O-Emissionen, eine untergeordnete Rolle zu spielen. Bezüglich der energiebedingten N<sub>2</sub>O-Emissionen sind für das Jahr 1987 in der Bundesrepublik Deutschland

(ohne ehemalige DDR) die Sektoren Kraftwerke und Fernheizwerke und die Industrie von besonderer Bedeutung. Es ist darauf hinzuweisen, daß in bestimmten Emittentenbereichen, zum Beispiel den Großfeuerungsanlagen oder dem Verkehrssektor, aufgrund von gesetzlich festgelegten Emissionsgrenzwerten verschiedene Maßnahmen zur Emissionsminderung inzwischen bereits verwirklicht sind beziehungsweise in absehbarer Zeit durchgeführt werden, die für einzelne Spurengase zu deutlichen Emissionsminderungen führen werden. Allerdings ist davon auszugehen, daß damit das gesamte technisch mögliche Minderungspotential noch nicht ausgeschöpft wird.

### 3. Tabellenverzeichnis

- Tab. 1: Derzeitige energiebedingte weltweite CO<sub>2</sub>- und Methan-Emissionen
- Tab. 2: Kennziffern der Bestimmungsgrößen für die derzeitigen CO<sub>2</sub>-Emissionen
- Tab. 3: Szenarien zur weltweiten CO<sub>2</sub>-Emissionsentwicklung bis zum Jahr 2005, in Milliarden Tonnen
- Tab. 4: Spezifische Emissionsfaktoren von fossilen Energieträgern für CO<sub>2</sub> und CH<sub>4</sub> in kg CO<sub>2</sub> Äquivalent je Gigajoule (GJ) Input
- Tab. 5: Treibhausgasemissionen verschiedener Emittentenbereiche in der Bundesrepublik Deutschland (ohne ehemalige DDR) im Jahr 1987 (gerundet)

### 4. Abbildungsverzeichnis

- Abb. 1: Energiebedingte CO<sub>2</sub>-Emissionen der Bundesrepublik Deutschland (ohne ehemalige DDR) im Jahre 1987 (Bilanzierung der Industrie-Eigenstromerzeugung bei der Stromerzeugung und nicht bei der Industrie)
- Abb. 2: Methan-Emissionen aus dem Energie- und Abfallbereich der Bundesrepublik Deutschland (ohne ehemalige DDR)
- Abb. 3: Methan-Emissionen aus Verbrennung nach Emittentenbereichen und Energieträgern (in Abb. 2 schraffierter Bereich) der Bundesrepublik Deutschland (ohne ehemalige DDR)

## 4. KAPITEL

### Potentiale einzelner Emissionsminderungsmaßnahmen bis zum Jahr 2005 und Ausblick auf 2050

#### Vorbemerkung

Die Vermeidung oder Verminderung der klimarelevanten Emissionen der Energieumwandlung ist nicht in allen Fällen technisch so einfach zu lösen wie bei den „klassischen“ Luftschadstoffen (SO<sub>2</sub>, Staub, Kohlenwasserstoffe, Stickoxide (NO<sub>x</sub>)). Eine besonders deutliche Ausnahme macht das Kohlendioxid (CO<sub>2</sub>), das — im Gegensatz zu vielen konventionellen Luft-

schadstoffen — keine örtlich oder regional begrenzten Gefahren direkt heraufbeschwören kann und nur in beschränktem Umfang (nämlich bei großen stationären Anlagen, vgl. Nr. 7) über eine Rückhaltetechnik emissionsseitig begrenzt werden könnte.

Vielmehr liegen die wesentlichen Emissionsminderungsmaßnahmen in ihrer Vermeidung durch



- rationellere Energieverwendung und Energieeinsparung durch energiebewußtes Verhalten und Verzicht auf Energiedienstleistungen (vgl. Nr. 2),
- Substitution der kohlenstoffreichen Energieträger durch
  - erneuerbare Energieträger (vgl. Nr. 3),
  - weniger kohlenstoffreiche fossile Energieträger, insbesondere Erdgas (vgl. Nr. 4),
  - Kernenergie (vgl. Nr. 5)
  - neuen Sekundärenergieträgern, wie zum Beispiel Methanol oder Wasserstoff (vgl. Nr. 6),
- neue Energienutzungssysteme mit neuen Speichern (vgl. Nr. 6),
- CO<sub>2</sub>-Rückhaltung und -Entsorgung (vgl. Nr. 7) sowie
- eine veränderte Verkehrspolitik zur Veränderung des Trends zu energieintensiven Verkehrsmitteln, wie zum Beispiel zum Straßen- und Flugverkehr (vgl. Nr. 8.)

**1. Definitionen, Annahmen und Voraussetzungen<sup>1)</sup>**

Bevor diese technischen und organisatorischen Emissionsminderungsmaßnahmen, ihre Potentiale, Kosten und Hemmnisse im einzelnen erläutert werden, sei eingangs auf eine Reihe von gemeinsamen Begriffen, Annahmen und Voraussetzungen verwiesen, die im Sommer 1989 zur gemeinsamen Grundlage der Untersuchungen festgelegt wurden („Analyseraster“).

**1.1 Definitionen**

Erwartungspotentiale zu einem gegebenen Zeitpunkt (zum Beispiel für das Jahr 2005)

Das wirtschaftliche Emissionsminderungspotential (zum Beispiel durch rationelle Energienutzung oder Gassubstitution) ist im allgemeinen nicht binnen we-

<sup>1)</sup> Dieser Teil wurde im Rahmen der zusammenfassenden Energiestudie (vgl. 6. Kapitel) von Dr. Jochem federführend bearbeitet.

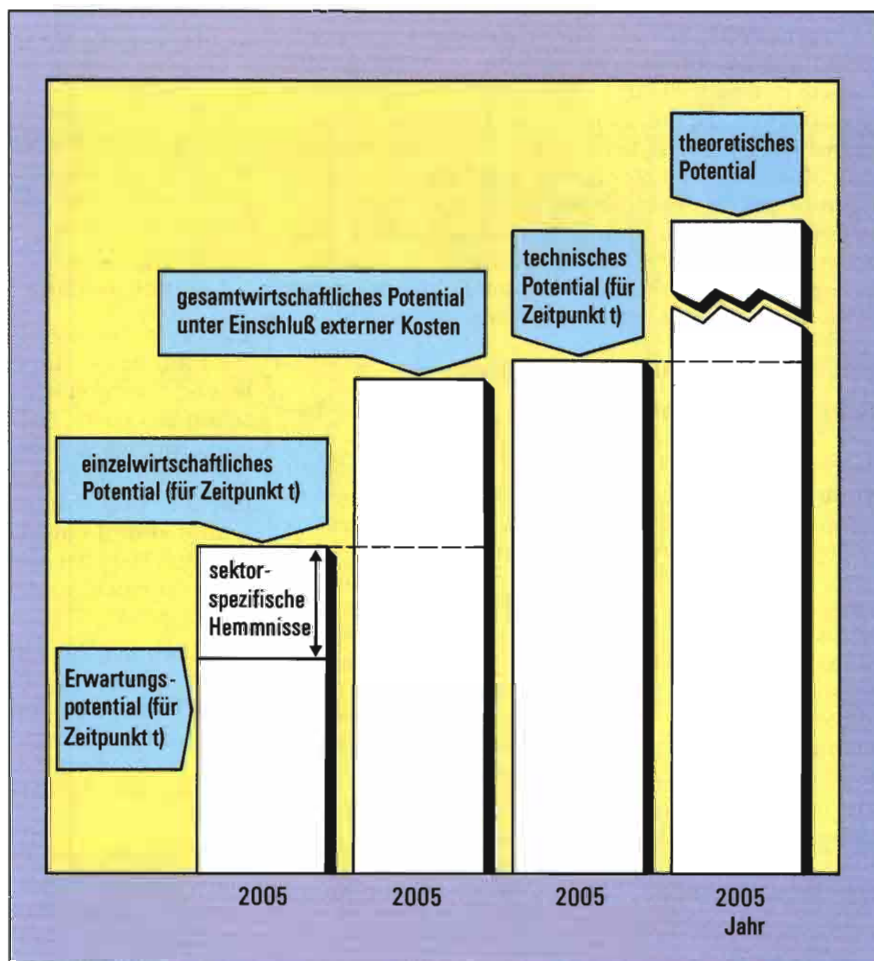


Abb. 1: Schema der Emissionsminderungspotentiale (zum Beispiel durch rationelle Energienutzung oder Substitution mittels kohlenstoffarmer oder kohlenstofffreier Energieträger)

niger Jahre, sondern wegen der Ersatzinvestitionszyklen der Anlagen, Maschinen, Fahrzeuge oder Gebäude erst langfristig erschließbar. Hinzu kommt, daß selbst bei Berücksichtigung eines vollen Reinvestitionszyklus das wirtschaftliche Emissionsminderungspotential nicht voll realisiert sein muß, weil dieser Potentialausschöpfung Hemmnisse, zum Beispiel mangelnde Kenntnisse und Kapitalverfügbarkeit der Investoren oder rechtliche Restriktionen, entgegenstehen können. Deshalb sind die Erwartungspotentiale in der Regel kleiner als die einzelwirtschaftlichen Emissionsminderungspotentiale (vgl. Abb. 1).

### Wirtschaftliche Emissionsminderungspotentiale

Einzelwirtschaftliche Emissionsminderungspotentiale umfassen für die jeweiligen technischen Möglichkeiten diejenigen Emissionsmengen, die bei einem gegebenen Energiepreisniveau wirtschaftlich rentabel reduziert werden könnten, wobei unterstellt wird, daß es keine Hemmnisse oder hemmende Rahmenbedingungen gibt.

Für Wirtschaftlichkeitsberechnungen werden im allgemeinen die dynamische Annuitäten- oder Barwertmethode benutzt. Die Kostenangaben werden zu Preisen von 1987 abgezinst. Als Abschreibungsdauer wurde die Nutzungsdauer der Anlagen, Maschinen oder Geräte angesetzt. Als Diskontrate wurde real mit 4 Prozent pro Jahr gerechnet.

Die so ermittelten (einzel-)wirtschaftlichen Emissionsminderungspotentiale sind um ein nicht bekanntes Ausmaß geringer als die volkswirtschaftlichen Emissionsminderungspotentiale; diese Differenz berücksichtigt die externen Kosten des Energieverbrauchs (einschließlich der Folgekosten möglicher Klimaveränderungen), deren Höhe bei klassischen Schadstoffen heute noch umstritten ist (zwischen 7 und 45 Milliarden DM/a, das heißt zwischen durchschnittlich 0,6 bis 4,- DM/GJ). Die klimabedingten Folgewirkungen sind heute praktisch unerforscht und unbekannt.

### Technische Emissionsminderungspotentiale

Die technischen Emissionsminderungspotentiale beschreiben diejenigen Emissionsminderungen, die mittels heute bekannter und zumindest im Pilotmaßstab erprobter Techniken realisierbar erscheinen. Bei den Energieversorgungstechniken sollten darüberhinaus die Verfügbarkeit von Standorten (zum Beispiel bei Wind, Großkraftwerken), konkurrierende Nutzungen sowie ökologische Begrenzungen miteinbezogen werden. Soweit es möglich war, sollten die technischen Emissionsminderungspotentiale in Abhängigkeit von den Kosten pro vermiedener CO<sub>2</sub>-Emissionsmenge angegeben werden. Eine derartige Kosten-Emissionsminderungsfunktion war für die rationelle Energienutzung wegen der unzureichenden Datengrundlage und der Vielzahl möglicher Technologien, insbesondere im Produktionsbereich, nur in Feldern mit relativ homogenen Technikanwendungen möglich (zum Beispiel Altbau, Neubau, Kraft-Wärme-Kopplung).

### Theoretische Emissionsminderungspotentiale

Diese Angaben sind insbesondere für jene Bereiche von Bedeutung, für die heute infolge fehlender tech-

nischer Konkretion noch keine technischen Potentiale angegeben werden können, wo aber mit technologisch und naturwissenschaftlich fundierten Kenntnissen davon ausgegangen werden kann, daß sich in Zukunft neue technische Potentiale eröffnen werden. Beispiele sind Aussagen über künftige Verminderungen des Nutzenergiebedarfs in der Industrie durch Prozeßsubstitutionen oder die Kernfusion. Für den Fall einer Energiequelle bezeichnet man das physikalische Dargebot, zum Beispiel die potentielle Energie aller Flüsse eines Landes, als theoretisches Potential.

Die Potentialangaben für rationelle Energienutzung, Energieträgersubstitution durch erneuerbare Energiequellen, Naturgas oder Kernenergie sowie durch CO<sub>2</sub>-Rückhaltung sind jeweils daraufhin zu prüfen, ob sie addiert werden können, sich komplementär ergänzen oder sich gegenseitig ausschließen (vgl. Nr. 9).

### Rationelle Energieverwendung und -nutzung

Der Begriff der rationellen Energieverwendung wird hier — im Unterschied zu seiner ökonomischen Definition — technisch interpretiert und umfaßt jede Form des verminderten direkten Energieeinsatzes in einem energieumsetzenden Prozeß, das heißt, er beinhaltet

- sowohl die Verminderung von Energie- und Exergieverlusten bei der Energieumwandlung,
- als auch die Verminderung des spezifischen Nutzenergiebedarfs.

Der Begriff der rationellen Energienutzung umfaßt allerdings nicht die Verminderung von Energiedienstleistungen (zum Beispiel die Absenkung der Raumtemperatur oder die Verminderung von Reisegeschwindigkeiten)

### 1.2 Annahmen und Voraussetzungen

Es wurde der Zeitraum zwischen 1987 und 2050 betrachtet, wobei die Potentiale bis 2005 detailliert untersucht werden konnten und sollten. Für die Zeit zwischen 2005 und 2050 ist die Quantifizierung von energieverbrauchsbestimmenden Größen und der energiebedingten klimarelevanten Emissionen aus methodischen und inhaltlichen Gründen spekulativ; sie wurde aber dennoch wegen der langfristigen Gefahrenpotentiale der klimarelevanten Emissionen ansatzweise versucht und in Nr.3 zusammenfassend dargestellt.

Angaben zur Bevölkerungsentwicklung, zu Wohnflächen, zur Entwicklung von Bruttosozialprodukt, Wirtschaftsstruktur, Industrieproduktion, Verkehrsleistungen und Energiepreisen wurden zunächst nur bis 2005 angegeben (vgl. Tab. 1), später durch eine parallel laufende Untersuchung auf 2050 erweitert (vgl. Nr.3).

Die Energiepreise entwickeln sich bis 2005 bei den Ölprodukten, Importkohle und Naturgas in Anlehnung an die angenommene Entwicklung beim Rohöl als Preisführer: Aufgrund der bis zur Jahrhundertwende zu erwartenden Tendenz eines deutlichen Öl-Überangebots und einer anhaltend kräftigen Förderung in den Nicht-OPEC-Ländern wird unterstellt, daß die Mineralölpreise real um rund 50 Prozent stei-

## Annahmen über wesentliche energieverbrauchsbestimmende Größen, 1987 bis 2005

Größe	1987	1995	2005
Wohnbevölkerung (in Mio.) . . . . .	61,3	61,7	60,0
private Haushalte (in Mio.) . . . . .	27,2	27,7	27,0
Wohnfläche (in Mio. m <sup>2</sup> ) . . . . .	2 040	2 160 <sup>3)</sup>	2 270 <sup>3)</sup>
Wachstum des Bruttonettoprodukts . . . . .	2,5 %/a		2,3 %/a
Wachstum der Nettoproduktion des Verarbeitenden Gewerbes . . . . .	2,4 %/a		2,3 %/a
Verkehrsleistungen (Mrd. Pkm/tkm)			
— Personenverkehr, 60 Mio., Trend . . . . .	750	k. A.	965
— Personenverkehr, 60 Mio., Reduktion . . . . .	750	k. A.	873
— Güterverkehr (Mrd. tkm) . . . . .	268	k. A.	359
realer Ölimportpreis (DM/GJ) . . . . .	5,90	6,40	9,00
HEL, Haushalte <sup>1)</sup> (DM/GJ) . . . . .	10,50	12,10	17,10
HEL, Großverbraucher <sup>2)</sup> (DM/GJ) . . . . .	9,30	10,30	14,40
HS, Großverbraucher (DM/GJ) . . . . .	5,80	6,20	8,80
Normalbenzin (DM/GJ) . . . . .	29,70	34,90	42,60
Superbenzin (DM/GJ) . . . . .	30,80	36,4	44,50
Diesel (DM/GJ) . . . . .	25,60	33,20	38,10
Erdgas, Grenzübergang (DM/GJ) . . . . .	4,50	4,70	6,50
Erdgas, Haushalte (DM/GJ) . . . . .	15,30	15,60	20,60
Erdgas, Industrie (DM/GJ) . . . . .	7,30	8,90	10,90
Steinkohle, Großabnehmer (DM/GJ) . . . . .	9,80	9,90	10,50
Braunkohle, Großabnehmer (DM/GJ) . . . . .	3,60	3,40	3,50
Importkohle (DM/GJ) . . . . .	3,00	3,70	4,70
Haushaltsstrom (Pf/kWh) . . . . .	28,7	25,6	29,8
— Arbeitspreis (DM/GJ) . . . . .	21,0	20,0	25,0
Heizstrom (DM/GJ) . . . . .	12,3	10,1	12,4
Industriestrom			
— Hochspannung (DM/GJ) . . . . .	14,2	12,0	14,2
— Niederspannung (DM/GJ) . . . . .	24,0	22,0	24,0

<sup>1)</sup> Haushalte incl. MWSt.

<sup>2)</sup> Unternehmen ohne MWSt.

<sup>3)</sup> Zahlenbasis anhand alter Bestandsfortschreibung

gen. Das für 2005 unterstellte Preisniveau von 22,5 US\$/Barrel (in 1987er Preisen) beträgt damit rund 50 Prozent des 1980 bereits erreichten Preisniveaus. Die Preisentwicklung der einheimischen Braun- und Steinkohle sowie des Stroms orientiert sich an den Produktionskosten, die – real betrachtet – nur in sehr geringen Grenzen bei der Steinkohle steigend (+7 Prozent) und ansonsten als stagnierend angenommen werden (zur Orientierung 17,10 DM/GJ entsprechen rund 67 Pf/ltr Heizöl, oder der Benzinpreis von 42,60 DM/GJ entspricht rund 1,55 DM/ltr). Die Entwicklung des Preises der Importkohle von 3,– DM/GJ auf 4,70 DM/GJ ist für die Kostenrechnungen bei den Substitutionen von Steinkohle wich-

tig, weil hierzu stets der Kohle-Importpreis herangezogen wurde.

Aus methodischen Gründen wurden zur Bestimmung des Energiebedarfs und der Einsatzpotentiale der erneuerbaren Energiequellen die für 2005 vorgegebenen Energiepreise im Inland für zwei Varianten modifiziert. Dazu wurden die Preise für Endenergieträger, das heißt die Brennstoffpreise mit 5 beziehungsweise 15 DM/GJ und die Strompreise mit rund 2 beziehungsweise 7 Pf/kWh beaufschlagt und unterstellt, daß die bestehenden Hemmnisse rationeller Energienutzung abgebaut wären. Ob und in welchem Ausmaß die höheren Energiepreise durch andere Ent-

wicklungen auf den Weltenergiemärkten oder als Folge von Abgaben- oder Steuererhöhungen in den Industriestaaten oder der Bundesrepublik Deutschland zu interpretieren sind, wurde in den Annahmen und Voraussetzungen offengelassen, wengleich einige Folgewirkungen dieser preissteigernden Ursachen unterschiedlich ausfallen würden. Dieses Offenlassen der Ursachen eines höheren Preisniveaus für Endenergieträger für 2005 hat folgende Gründe:

- Zum einen ist heute nicht absehbar, wie die Preisentwicklung auf den Weltenergiemärkten gestaltet wird, wenn beispielsweise die OECD-Staaten und die Comecon-Staaten, die heute 75 Prozent der energiebedingten CO<sub>2</sub>-Emissionen verursachen, sich zu einer CO<sub>2</sub>-Minderungspolitik, orientiert an den Zahlen von Toronto, entschließen sollten. Der dadurch bedingte starke Nachfragerückgang für Rohöl und Steinkohle könnte vielleicht nur dadurch ohne erhebliche Preiseinbrüche (und damit den CO<sub>2</sub>-Zielen widersprechenden Reaktionen) erreicht werden, wenn die Energieanbieterländer von den Industrieländern einen kompensatorischen Preisaufschlag für den Mengenrückgang eingeräumt bekommen.
- Zum zweiten wollten die Autoren den Diskussionsergebnissen der Enquete-Kommission nicht vorgehen, inwieweit Energie-Preisanhebungen durch Steuern oder durch Sonderabgaben realisiert werden. Die Sonderabgabenlösung hätte aufgrund der Doppelwirkung bei ihrer Verwendung zum Anreiz energiesparender Investitionen den Vorteil, daß die Abgabe nur etwa halb so hoch ausfallen müßte wie eine Steuer.

Die Verkehrsleistungen im motorisierten Personenverkehr, die in der Trend-Variante bis 2005 um knapp 29 Prozent zunehmen, wurden in der Reduktionsvariante auf einen Zuwachs von 16 Prozent begrenzt. Diese Reduktion ist nicht unbedingt als „Konsumverzicht“ zu interpretieren, sondern auch als Folge kürzerer Wege im Siedlungsbereich durch siedlungspolitische Neuorientierungen und verstärkte Nutzung des Fahrrades (+20,8 Prozent oder 3,2 Milliarden Personenkilometer; vgl. Nr. 8).

Diese Annahmen und Voraussetzungen dienen dazu, die Potentiale der verschiedenen Treibhausminderungsmöglichkeiten bis zum Jahre 2005 zu quantifizieren und die Minderungskosten abzuschätzen. Dabei wurde auf folgende Aspekte für jede technische Option der Verminderung klimatischer energiebedingter Emissionen eingegangen:

- technische und wirtschaftliche Reduktionspotentiale,
- derzeitige und zum Teil absehbare Kosten der Reduktionsmaßnahmen,
- Hemmnisse sowie Erwartungspotentiale bis 2005,
- Maßnahmen zum Abbau der Hemmnisse sowie
- langfristige (bis 2050) denkbare technische Entwicklungen.

Die im einzelnen dargelegten Ergebnisse basieren weitgehend auf den vorliegenden Einzelstudien von

A.1 bis A.6 und F.1 bis F.4 sowie auf den dazu von den Koordinatoren erstellten zusammenfassenden Berichten (vgl. 6. Kapitel).

## 2. Emissionsvermeidung durch rationelle Energieverwendung und energiebewußtes Verhalten<sup>1)</sup>

(Studienkomplex A 1)

Die bessere Ausnutzung von Energie oder eine bewußtere Inanspruchnahme von Wärme, Kraft und Licht seitens der Energieverbraucher eröffnen die Möglichkeit, selbst bei wachsender Produktion die energiebedingten klimarelevanten Emissionen in der Bundesrepublik Deutschland zu senken. Diese Möglichkeiten werden von der Fachwelt und der Enquete-Kommission als besonders bedeutsam zur Entschärfung des Klimaproblems und als Beitrag einer langfristig umweltverträglichen Entwicklung der Weltwirtschaft angesehen; denn

- als a priori Hypothese erwartete die Enquete-Kommission (1988) von der rationellen Energieverwendung die größten realisierbaren Emissionsminderungspotentiale innerhalb der nächsten zwei Jahrzehnte unter wirtschaftlichen Aspekten und Akzeptanz-Gesichtspunkten;
- ein rationellerer Umgang mit Energie reduziert nicht nur die klimarelevanten Emissionen sondern auch die „konventionellen“ Emissionen von Luftschadstoffen mit ihren Schäden in Forst- und Agrarwirtschaft, ihren Gesundheitsschäden sowie Korrosionsschäden an Bauwerken und auch die thermischen Belastungen, die bereits heute in Verdichtungsräumen zu kleinklimatischen Veränderungen führen; auch die Emissionen der Kernergietechnik werden indirekt durch rationelle Energieverwendung reduziert,
- die rationelle Energieverwendung schont die natürlichen Ressourcen durch Nutzung „Know-how“-intensiver Produkte und Dienstleistungen, das heißt durch ein Mehr an den positiven Standortfaktoren eines Industrielandes wie der Bundesrepublik Deutschland.

Die künftigen Möglichkeiten rationeller Energieverwendung werden oft – trotz sehr eindrucksvoller Entwicklungen seit 1973 – noch immer unterschätzt; während sich das Bruttoinlandsprodukt in der Bundesrepublik Deutschland (ohne ehemalige DDR) von 1973 bis 1989 um rund 38 Prozent erhöhte, nahm der Primärenergieverbrauch nur um gut 1 Prozent (oder 130 PJ) auf etwa 11 250 PJ zu. Berücksichtigt man, daß etwa ein Viertel dieser Verminderung der Energieintensität auf Sättigungseffekte und Struktureffekte zu weniger energieintensiven Produktionen zurückgeführt werden kann, so trug die rationelle Energieverwendung dazu bei, daß 1989 etwa 3000 PJ Energie (ca. 27 Prozent) nicht gebraucht wurden, die man mit den Energieproduktivitäten von 1973 benötigt hätte. Durchschnittlich wurden also in den vergangenen 16 Jahren jährlich 2 Prozent Primärenergie durch rationelleren Umgang mit Energie gespart.

<sup>1)</sup> Dieser Teil wurde im Rahmen der zusammenfassenden Energiestudie (vgl. 6. Kapitel) von Dr. Jochem federführend bearbeitet.

**2.1 Die Rolle der rationellen Energienutzung und -umwandlung**

Alles energetische und energiewirtschaftliche Handeln wird ausgelöst durch die Nachfrage nach Energiedienstleistungen. Energiedienstleistungen sind zum Beispiel

- das Erwärmen oder das Abkühlen von Räumen oder Gebäuden,
- das Erwärmen von Wasser für die Körperpflege oder für das Geschirrspülen,
- das Beleuchten von Innenräumen und Außenflächen,
- das Transportieren von Personen und Gütern,
- das Erwärmen, Umformen oder Umwandeln von Gütern bei der gewerblichen Verarbeitung von Stoffen und der Nahrungsmittelaufbereitung.

Menge und Qualität einzelner Energiedienstleistungen können durch Kennzahlen quantifiziert werden, zum Beispiel bei der Raumheizung durch die empfundene Temperatur, beim Beleuchten durch die geforderte Leuchtdichte und Lichtfarbe oder bei der Produktion durch das Gewicht und die Qualität der hergestellten Produkte. Nachfrage nach derartigen Dienstleistungen führt zu einem Nutzenergiebedarf von Wärme, Kraft oder Licht (vgl. Abb. 2), der unter

Inkaufnahme von mehr oder weniger großen Energieverlusten der Energiewandler und Energietransporte zu einem Energiebedarf beim Verbraucher (zum Beispiel Koks, Benzin, Heizöl, Fernwärme, Gas, Strom) und über eine weitere Umwandlungsstufe (zum Beispiel Kokerei, Raffinerien, Kraftwerke) zu einem Primärenergiebedarf führt (vgl. Abb. 2). Alle durch die Energiedienstleistungen in den einzelnen Stufen der Umwandlungskette ausgelösten Nachfragen nach Energie könnten in Zukunft durch einen rationelleren Umgang mit Energie vermindert werden. In dem Maße, in dem Energie auf den verschiedenen Umwandlungsstufen rationeller genutzt würde, ließen sich auch die klimarelevanten Emissionen vermindern.

**2.2 Technische Potentiale rationeller Energienutzung aus heutiger Sicht**

Als technische Energieeinsparpotentiale werden hier diejenigen Energiemengen bezeichnet, die man mit heute verfügbaren technischen Lösungen oder heutigen Kenntnissen (als Pilot- oder Laboranlagen) erreichen könnte, wenn der jeweils betrachtete Energieverbrauchsbereich völlig mit der neuen Technik ausgestattet wäre. Das technische Energieeinsparpotential wird hier auf den Energieverbrauch des Jahres 1987 bezogen und ist stets größer als das wirtschaftliche Energieeinsparpotential (vgl. Abb. 1). Im folgenden werden die in Tabelle 2 genannten technischen Energieeinsparpotentiale kurz kommentiert:

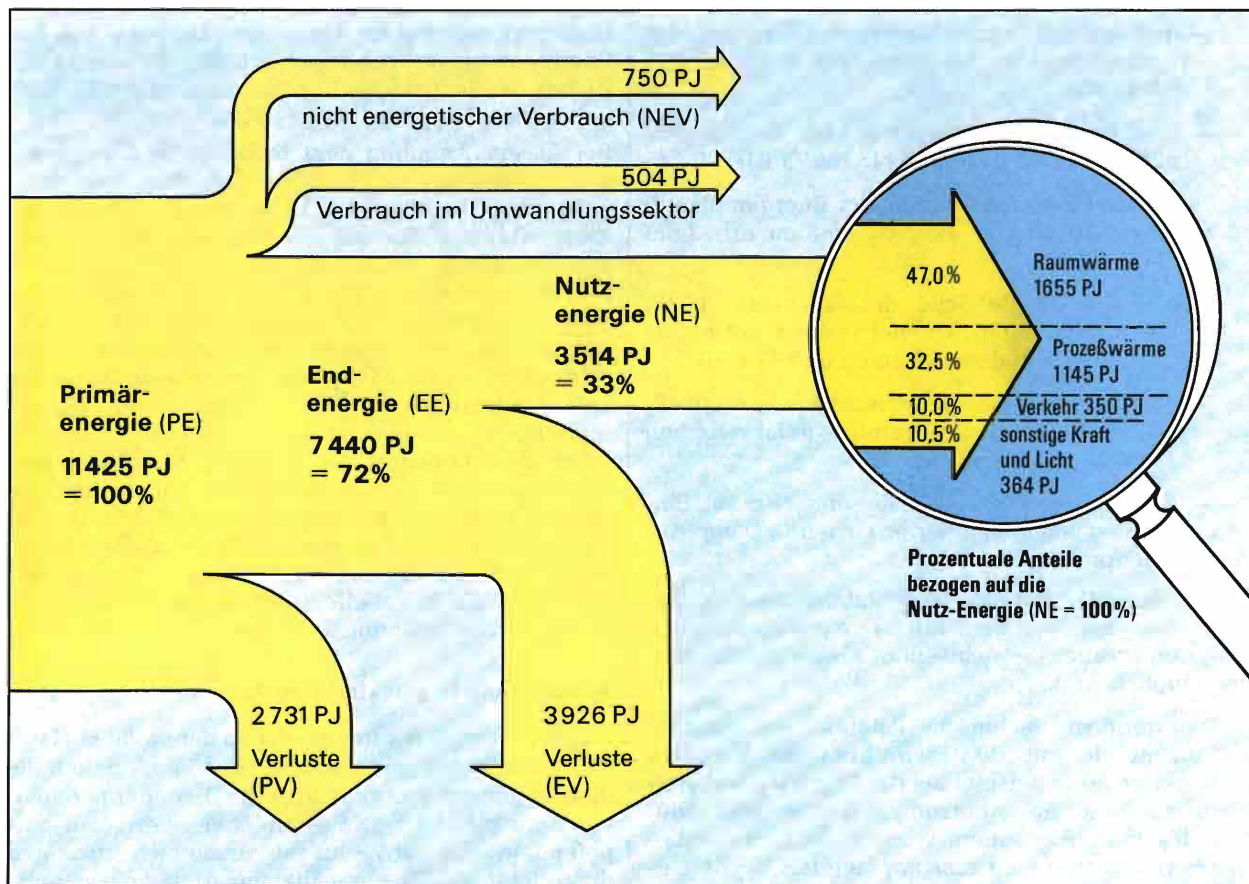


Abb. 2: Energieflußdiagramm für Primär-, End- und Nutzenergie für die Bundesrepublik Deutschland (ohne ehemalige DDR) im Jahre 1988

- Die größten technischen Potentiale rationeller Energienutzung liegen im Raumwärmebedarf mit – je nach Gebäude – 70 bis 90 Prozent, wobei der Hauptbeitrag zur Endenergieverbrauchsminde- rung durch den wesentlich erhöhten Wärmeschutz erreicht werden könnte. Wenn der Endenergie- verbrauch für Raumwärme im Jahre 1987 etwa 2370 PJ bei den privaten Haushalten und in den Nichtwohngebäuden in Kleinverbrauch und Indus- trie betrug, so ist das gesamte technische Einspar- potential mit 1800 bis 2100 PJ extrem hoch. Aller- dings muß bei dem hohen Eckwert berücksichtigt werden, daß bei derartigen Niedrigenergiegebäu- den ein zusätzlicher Strombedarf von 4 bis 12 kWh/m<sup>2</sup>a, das heißt beispielsweise für eine Wohn- fläche des Bestandes von 1987 ein zusätzlicher Strombedarf von 30 bis 90 PJ erforderlich sein würde.
- Etwas niedrigere Potentiale haben zwei Fahrzeug- gattungen, die PKW und Flugzeuge, mit rund 50 bis 60 Prozent. Diese Potentiale von 700 bis 850 PJ sind von besonderer Bedeutung, weil sowohl der Individualverkehr wie der Luftverkehr in der Ver- gangenheit hohe Energieverbrauchssteigerungen infolge wachsender Fahrleistungen hatten und auch für die Zukunft im allgemeinen ein weiteres Wachstum unterstellt wird.
- Technische Einsparpotentiale zwischen 30 und 50 Prozent sind zu finden bei:
  - vielen Elektrogeräten (Gesamtpotential: 75 bis 125 PJ<sub>el</sub>),
  - den prozeßwärmeintensiven Branchen des Kleinverbrauchs (Gesamtpotential: 150 bis 250 PJ) sowie
  - dem Brennstoffverbrauch bei der Verbrauchs- güterindustrie (Potential: 45 bis 75 PJ)
- Technische Potentiale rationeller Energienutzung zwischen 15 und 30 Prozent werden errechnet für
  - die übrigen Bereiche des Verkehrs (LKW, Busse, Bahn und Schienenverkehr mit einem Gesamtpotential zwischen 85 und 170 PJ),
  - die meisten Branchen der Industrie (einschließ- lich der Raffinerien, Gesamtpotential zwischen 390 und 580 PJ) und
  - den Kraftwerkssektor, insbesondere durch Ein- führung von kombinierten Gas- und Dampftur- binenprozessen.

Die Einsparpotentiale bei den Nutzfahrzeugen sind gegenüber den oben genannten Personenfahrzeugen geringer, wo auch Gewichts- und Leistungsminderun- gen möglich sind.

- Das geringste technische Potential von rund 10 Prozent oder gut 520 PJ wird bei vielen Stroman- wendern (zum Beispiel bei der Warmwasserberei- tung und der Stromnutzung in den meisten Indus- triesektoren) gesehen. Wesentliche Gründe dies- es relativ geringen Einsparpotentials liegen ein- mal im relativ hohen Jahreswirkungsgrad bei der Umwandlung elektrischer Energie in Nutzenergie in vielen Anwendungsfällen, zum anderen in der

Nettobetrachtung der technologischen Entwick- lung begründet. Denn ein absehbarer Strommehr- bedarf für Automation, weitere Produktivitätsstei- gerungen und Umweltschutzanlagen sowie für prozeßtechnische Substitutionen (zum Beispiel bei der Glaserzeugung und Metalloberflächenbe- handlung) wurde in den Angaben mit dem abseh- baren Stromminderbedarf infolge rationeller Stromnutzung bereits verrechnet.

In den Angaben von Tabelle 2 sind allerdings die absehbaren weiteren strukturellen Entwicklungen zu weniger energieintensiven und höherwertigen Pro- duktionen und Dienstleistungen in der Wirtschaft nicht berücksichtigt. Dieser Einfluß des Produktstruk- turwandels innerhalb der einzelnen Branchen dürfte in Zukunft auf den spezifischen Energieverbrauch (im Nenner mit einem Produktionswert definiert) zuneh- men, wie Einzelanalysen am Beispiel der Chemischen Industrie oder der Papierindustrie zeigen (zum Bei- spiel Spezialkunststoffe, Spezialpapiere). Anderer- seits sind Angaben zu strukturellen Veränderungen hin zu energieintensiverem Konsum (zum Beispiel mehr zentral beheizte Wohngebäude, größere und lei- stungsstärkere PKW, Zuwachs der Flugverkehrslei- stungen pro Kopf) nicht in den technischen Potenti- alangaben enthalten.

Schätzt man die aufgeführten technischen Potentiale rationeller Energieverwendung – jeweils mit ihrem Energieverbrauchsanteil gewichtet – zusammenfas- send, so ergibt sich ein Wert von 35 bis 44 Prozent, wobei die einzelnen Angaben in Tabelle 2 oder die abgeschragten Potentialbalken in Abbildung 3 auf die Unsicherheitsbereiche hinweisen. Bezogen auf den Primärenergieverbrauch des Jahres 1987 von 11 370 PJ hat das technische Energieeinsparpotential eine Größenordnung von 4000 bis 5000 PJ.

Bei diesen Angaben zum technischen Energieein- sparpotential ist zu beachten, daß neue, hier nicht genannte Potentiale durch weitere Forschung und Entwicklung in Zukunft zusätzlich erschlossen wer- den. Denn mit Ausnahme weniger Einzelbereiche (wie zum Beispiel der Wärmedämmung bei Gebäuden oder der Wärmerückgewinnung bei Nieder- und Mit- teltemperatur-Abwärmeströmen) weiß man heute sehr wenig, wie in 25 oder 50 Jahren die industriellen und gewerblichen Herstellungsverfahren und -maschinen aussehen werden und welchen spezifi- schen Energiebedarf die Anlagen, Maschinen und Apparate dann erfordern werden. Die technologi- schen Umwälzungspotentiale sind langfristig als groß einzuschätzen. Im folgenden sei kurz auf die wesent- lichen technischen Einzelmaßnahmen hingewiesen, mit denen die in Tabelle 2 genannten Potentiale er- reicht werden könnten.

### Raumwärme in privaten Haushalten

Auf den Bereich der Raumheizung der privaten Haus- halte entfällt gegenwärtig unter den klimatischen Be- dingungen des Normaljahres ein Endenergiebedarf von rund 1600 PJ/a. Die technischen Energieeinspar- potentiale sind mit 70 bis 90 Prozent sehr groß und durch folgende Einzelmaßnahmen gekennzeichnet:

- Verminderung des Nutzenergiebedarfs durch er- heblich verstärkte Wärmeschutzmaßnahmen und

**Technische Potentiale rationeller Energienutzung in der Bundesrepublik Deutschland  
(ohne ehemalige DDR)**

(in Prozent, bezogen auf den Energieverbrauch von 1987)<sup>1)</sup>

Sektor/Energieanwendung (Energieangaben in PJ für 1987)	technisches Potential in %	Bemerkungen
<b>Raumwärme</b> (2370)		
○ im Gebäudebestand (Wohngebäude und Nicht- wohngebäude)	70 bis 90	Hauptbeitrag durch erhöhten Wärme- schutz, ohne aktive Sonnenenergienut- zung
○ bei Neubauten (Wohngebäude und Nicht- wohngebäude)	70 bis 80	gegenüber heutiger Wärmeschutzver- ordnung, höherer Einsparwert bei Mehr- familien- und großen Gebäuden
<b>Warmwasserbereitung</b> (230)	10 bis 50	je nach Warmwasserbereitungssystem
Elektrogeräte (250)		(geringerer Wert bei Strom) Potentialan- gaben gegenüber dem Durchschnitt
○ Kühlschränke	60	heutiger Neugeräte
○ Gefriergeräte und Truhen	~60 bis 70	} (ohne Substitution von ohmscher Wärmeerzeugung)
○ Waschmaschinen	~30 bis 40	
○ Trockner	50	
○ Geschirrspüler	30	
<b>Fahrzeuge</b> (1990)		
○ PKW (1230)	~50 bis 60	Potentialangaben gegenüber heutigen Nutzfahrzeugen je nach Einsatz, im Nahverkehr hohe Einsparpotentiale
○ Busse, LKW	~15 bis 25	
○ Elektrotraktion	~15 bis 25	
○ Flugzeuge (190)	~50 bis 60	
<b>Kleinverbrauch</b>		
○ Bereich 1 (500)	~40 bis 50	meist Prozeßwärmeanwendungen hoher Raumwärmeanteil
○ Bereich 2 (795)	~50 bis 70	
<b>Industrie</b> (2200)		nur technische Effizienzsteigerungen kein Produktstrukturwandel unterstellt (einschließlich Kokereien)
○ Grundstoff		
– Brennstoffe (1326)	15 bis 20	
– Strom (358)	ca. 10	
○ Investitionsgüter		
– Brennstoffe (181)	15 bis 20	
– Strom (115)	15 bis 20	
○ Verbrauchsgüter		
– Brennstoffe (150)	40 bis 45	
– Strom (66)	ca. 10	
○ Nahrungsmittel		hohe Brennstoffeinsparungen in der Glas- und Textilindustrie
– Brennstoffe (126)	25 bis 30	
– Strom (30)	ca. 10	
<b>Umwandlungssektor</b>		
○ Raffinerien (188)	20 bis 25	für Brennstoffe und Strom etwa gleiches Potential
○ Kondensationskraftwerk (fossil gefeuert) (1950)		Kompensation der Verbesserungen durch mehr Umweltschutz hohe Ein- sparpotentiale gelten für Gas- und Braunkohleanlagen infolge höherer Stromkennzahl
– Bestand	0 bis 3	
– neue GuD-Anlagen und andere Konzepte	20 bis 30	
○ KWK-Anlagen (530)	ca. 15	
<b>Primärenergieverbrauch von 1987</b> (11370)	<b>Gesamteinspar- potential: 35 bis 44 %</b>	ohne Strukturwandel zu weniger ener- gieintensiven Produktionen oder höher energieintensivem Konsum, ohne weite- ren technischen Fortschritt

<sup>1)</sup> Die angegebenen Werte beziehen sich zum Teil auf unterschiedliche Datenbasen und wurden nicht für alle Bereiche im gleichen Detaillierungsgrad untersucht.

kontrollierte Lüftung (verminderte Wärmeverluste durch Wärmeleitung und Lüftung) in der Höhe von rund 70 Prozent bis 80 Prozent (je nach Gebäude) sowie

- Einsatz und optimaler Betrieb fortgeschrittener Heizungstechnik und veränderte Beheizungsstruktur mit Nutzungsgraderhöhungen (für Wärmeerzeugung, -verteilung und Regelung) von derzeit 74 Prozent auf 82 Prozent (kurzfristig) bis weit über 90 Prozent (Brennwertkesseltechnik, Wärmepumpen).

Längerfristig könnten die Energieeinsparpotentiale auch über 90 Prozent liegen, wenn anstelle der opaken Wärmedämmung eine transparente Wärmedämmung eingesetzt würde, so daß sich zusätzlich durch

passive solare Gewinne der Heizenergiebedarf weiter reduzieren ließe. Auch bei den Fenstersystemen wird man mit technisch und wirtschaftlich vertretbaren Lösungen rechnen können, deren Wärmedurchgang deutlich unter demjenigen heutiger Wärmeschutzverglasungen liegen wird. Allerdings wird man bei derartig stark wärmedämmten Gebäuden mit einem zusätzlichen Strombedarf für kontrollierte Lüftung rechnen müssen (ca. 4 bis 12 kWh/m<sup>2</sup>a).

### Elektrogeräte

Wenngleich bei vielen elektrischen Haushaltsgeräten in den letzten 15 Jahren merkliche Stromeinsparungen erzielt wurden, so sind die technischen Möglichkeiten zu einer weiteren Verminderung des spezifi-

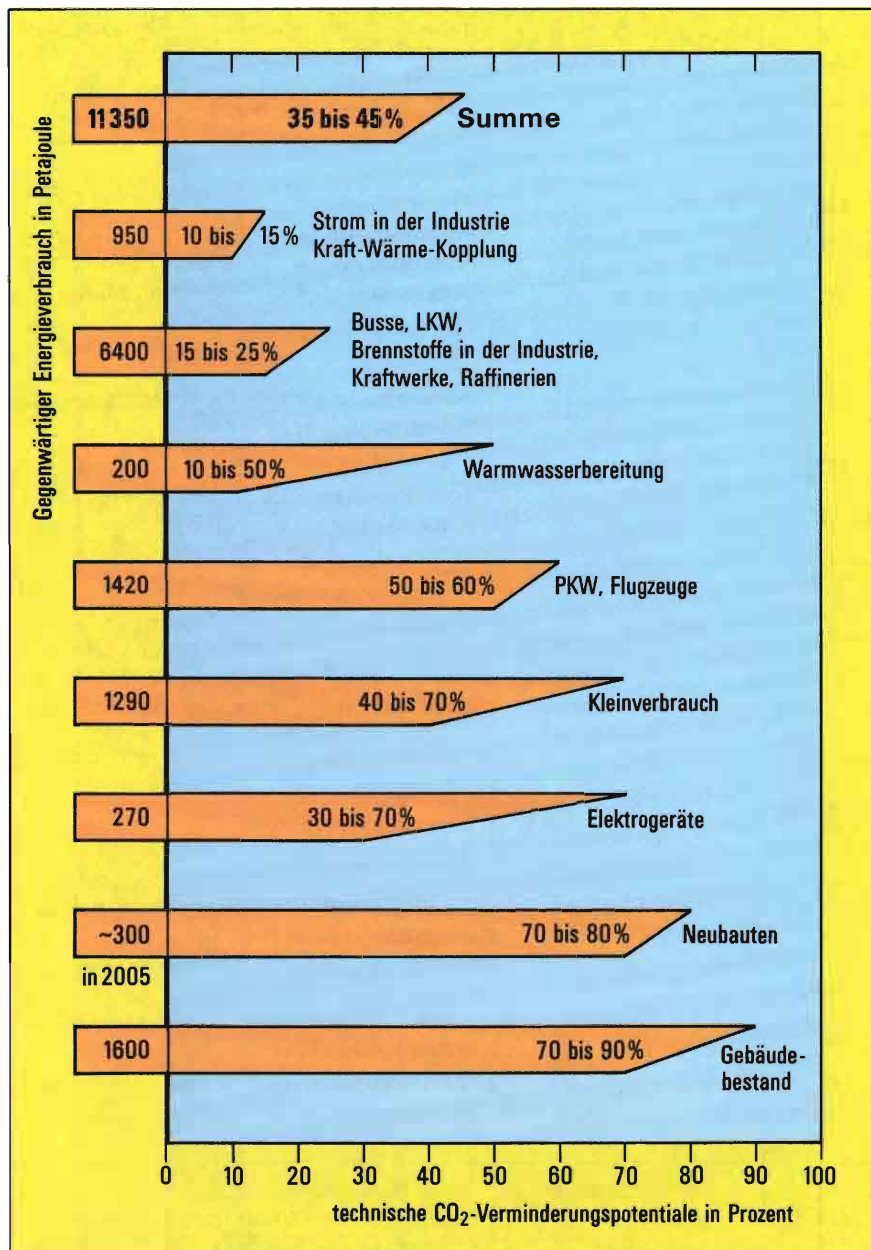


Abb. 3: Technische Potentiale der rationellen Energieverwendung in der Bundesrepublik Deutschland ohne ehemalige DDR (in Prozent, bezogen auf den Energieverbrauch des jeweiligen Anwendungsfeldes im Jahr 1987)



schen Stromverbrauchs der Geräte bei weitem noch nicht ausgeschöpft. Allerdings sind die technischen Stromeinsparpotentiale (gegenüber heutigen Durchschnittsverbräuchen) sehr unterschiedlich, zum Beispiel liegen sie zwischen

- rund 10 Prozent für elektrische Warmwasserbereiter und Wäschetrockner,
- etwa 30 bis 40 Prozent für Wasch- und Spülmaschinen sowie Fernseher und
- etwa 30 bis 70 Prozent für Kühlen, Gefrieren oder Kühl-Gefrierkombinationen (insbesondere durch verbesserte Wärmedämmung und Kompressoren).

Allerdings wird sich ein Teil dieser technischen Möglichkeiten nicht in entsprechenden Verminderungen des Strombedarfs der privaten Haushalte widerspiegeln, weil die spezifischen Stromeinsparungen durch einen weiteren Bestandszuwachs an Geräten teilweise wieder kompensiert werden.

### Verkehrssysteme

Auch hier sind die technischen Energieeinsparpotentiale je nach Fahrzeugart sehr unterschiedlich. Bei Straßenfahrzeugen sind die wesentlichen Ansatzpunkte Gewichtseinsparungen durch Verwendung leichter Materialien, eine weitere Verminderung des Luftwiderstandes sowie des Rollwiderstandes, die Motoroptimierung, die Motorabschaltung in der „Segelphase“, Bremsenergieerückgewinnung oder stufenlose Getriebe. Einsparungen von mehr als 50 Prozent bei PKW und mehr als 20 Prozent bei Bussen und LKW sind das Ergebnis der genannten technischen Maßnahmen.

Einsparpotentiale von 40 bis 50 Prozent werden auch für Flugzeuge aufgrund des verminderten Flugzeuggewichtes, Verminderung des Luftwiderstandes und durch Einsatz neuer Triebwerkskonzepte gesehen.

Bei Straßen-, Stadt- sowie Eisenbahnen führen ähnliche Verbesserungen (bei Gewicht, Luftwiderstand und Motorkonzepten) sowie die Rückspeisung von Bremsenergie in das Fahrleitungsnetz sowie ein verbesserter Wärmeschutz der Fahrzeuge zu 20 bis 25 Prozent Stromeinsparung, ein Potential, das auch Binnenschiffen zugesprochen wird.

Rein technisch betrachtet sind somit die Energieeinsparpotentiale bei PKW und Flugzeugen sehr hoch, allerdings besteht seit 1973 die Tendenz, daß diese Möglichkeiten durch Trends zu leistungsfähigeren und schwereren Fahrzeugen und weiterhin steigenden Fahrleistungen, insbesondere beim Flugverkehr, weitgehend kompensiert werden.

### Kleinverbrauch

50 Prozent der Energiemengen im Kleinverbrauch werden heute für die Raumwärme in Gebäuden des Kleinverbrauchs benötigt. Diese 50 Prozent können durch die oben besprochenen Techniken der Wärmedämmung und der Heiztechnik um 50 bis 70 Prozent vermindert werden. Hierbei ist bereits be-

rücksichtigt, daß man aus Denkmalschutzgründen viele ältere und historische Gebäude nicht so wie einen Neubau wärmedämmen können. Weitere Einsparpotentiale werden erzielt durch

- Wärmerückgewinnung und verbesserte Regelung von Klimaanlage,
- hocheffiziente Leuchten in Innenräumen und bei der öffentlichen Beleuchtung,
- Energiemanagementsysteme für Gebäude, Treibhäuser, Anlagen und Maschinen,
- Verbesserung bestehender Prozesse und Anlagen (zum Beispiel von Backöfen, Warmwasserbereitung, Trocknung, Nutzung des Energiegehaltes in Abwasser- und Abluftströmen),
- Substitution heutiger Prozesse, zum Beispiel der Lösemittelregeneration oder der Speisenbereitung.

Ohne die technischen Einsparpotentiale im einzelnen identifizieren und aggregieren zu können, wurde auf der Basis von vielen Einzelbeispielen in den genannten Prozeßwärme-, Beleuchtungs- und Klimatisierungsbereichen pauschal ein Potential von 40 bis 50 Prozent für die prozeßintensiven Bereiche des Kleinverbrauchs geschätzt.

### Industrie

Mit rund. 2200 PJ Endenergiebedarf benötigt die Industrie knapp 30 Prozent des gesamten Endenergieverbrauchs. Obwohl die Industrie seit 1970 ihren Energiebedarf um 460 PJ bei merklichem Produktionswachstum reduzieren konnte, sind auch in diesem Sektor die technischen Energieeinsparpotentiale mit 10 Prozent (Strom) und 15 bis 45 Prozent (Brennstoffe) noch erheblich. Eine Fülle von Herstellverfahren, Anlagen und Maschinen in der Industrie verhindert einen durchgängigen einzeltechnologischen Ansatz zur Beschreibung der technischen Einsparpotentiale. Er war teilweise in Zweigen der Grundstoffindustrie möglich, so zum Beispiel bei der Einschätzung der

- Verfahrenssubstitution (zum Beispiel Dünnbandgießen statt Stahlwalzen, Membranverfahren statt Rektifizieren oder Tieftemperaturtrennverfahren),
- Verfahrensverbesserungen (zum Beispiel der Zement-, Ziegel-, Zellstoff-, Papier- und NE-Metallherstellung, des Hochofens, der Kokereien, der Raffinerien, der mechanischen Formgebung, der Oberflächenbehandlung und Trocknung) und
- Erhöhung der Recyclingquoten energieintensiver Grundstoffe (zum Beispiel von Stahl, Aluminium, Kupfer, Blei, Zinn, Kunststoffen, Papier und Glas),

teilweise auch bei quer über die Branchen einsetzbaren Techniken wie

- der Einsatz von Leistungselektronik bei der Elektro-Motorregelung und hocheffizienten Leuchten,
- der Einsatz verbesserter Elektromotoren und anderer Arbeitsmaschinen wie zum Beispiel Pumpen, Ventilatoren, Kompressoren und Turbinen sowie

- verbesserte Brenner-, Feuerungs- und Kesseltechnik zur Wärmeerzeugung oder veränderte Verfahren zur Kälteerzeugung.

Für die übrigen Industriesektoren und Energieanwendungsbereiche wurden anhand von Einzelinformationen, Fallbeispielen und vorliegenden Schätzungen die Einsparpotentiale geschätzt. Die Ergebnisse wurden anhand von Extrapolationen spezifischer Brennstoff- und Stromverbräuche für die einzelnen Branchen überprüft und gegebenenfalls korrigiert.

### **Stromerzeugung, Kraft-Wärme-Kopplung und Raffinerien**

Bei den bestehenden fossil gefeuerten Kondensationskraftwerken können Brennstoffeinsatz und damit Emissionen durch kleinere Verbesserungen gesenkt werden (zum Beispiel Verbesserung der Feuerung und Verbrennung, Prozeßverbesserung bei der Wärmeabfuhr, Optimierung der Betriebsführung durch Prozeßrechner). Allerdings sind derartige Verbesserungen seit Jahrzehnten durchgeführt worden, so daß das verbleibende Potential nur noch auf 4 bis 5 Prozent geschätzt wird. In gleicher Größenordnung liegt allerdings – überwiegend bei Kohlekraftwerken – der umweltschutzbedingte Mehrbedarf (zum Beispiel für die Wiederaufheizung der Rauchgase nach der Entschwefelung, Reststoffbehandlung), so daß insgesamt bei bestehenden Anlagen nur ein geringes Energieeinsparpotential gesehen wird. Allerdings würde eine Vorschalt-Gasturbine bei Umrüstungsinvestitionen den Wirkungsgrad um 10 bis 20 Prozent verbessern.

Für die im üblichen Reinvestitionszyklus neu zu bauenden Kraftwerke kommen neue Kraftwerkstypen infrage, deren Gesamtwirkungsgrad gegenüber heute rund 38 Prozent bei über 40 bis 50 Prozent (letzte Angabe für Gas) liegen könnte. Mit steigendem Entwicklungsbedarf sind zu nennen: Gas- und Dampfturbinenkraftwerke, Kombikraftwerke mit kohlebefeuertem Dampferzeuger und vorgeschalteter erdgasbefeuertem Gasturbine, Kombikraftwerke mit Druckwirbelschichtfeuerung, Kombikraftwerke mit integrierter Kohlevergasung für den Gasturbinenteil (zum Beispiel bei der Braunkohle) und Zweistoff-Kraftwerke mit Kalium-Vorschaltung vor dem Dampfkreislauf.

Gekoppelte Kraft- und Wärmeerzeugung (KWK) ist mit Energieeinsparungen um rund 25 Prozent und entsprechend großen Emissionsminderungen verbunden, wenn dadurch die Stromerzeugung in Kondensationskraftwerken und die Wärmeerzeugung in Heizkesseln oder Heizwerken substituiert wird. Gegenüber den heutigen KWK-Anlagen ist eine Erhöhung der Stromkennzahl durch verbesserte Prozesse mit höherer Stromausbeute (zum Beispiel durch Regelung, Vorschaltturbinen, Motorverbesserungen) neuer Heizkraftwerk-Systeme mit einem Einsparpotential von 15 bis 20 Prozent möglich.

Bei Raffinerien sind weitere prozeßtechnische Verbesserungen durch Mikroelektronikanwendung, durch verbesserte Trennverfahren bei der Wasserstoffherzeugung und durch teilweisen Ersatz der Vakuumdestillation durch verbesserte Hydrierverfahren

möglich. Hieraus resultieren Einsparpotentiale zwischen 10 und 20 Prozent beim Brennstoffeinsatz und 5 bis gut 20 Prozent beim Strombedarf.

### **2.3 Einzelwirtschaftliche Potentiale und Erwartungspotentiale 2005 der rationellen Energienutzung und -umwandlung**

Bereits in Nr.1.1 wurde darauf hingewiesen, daß ein Teil der technischen Energieeinsparpotentiale bei heutigen oder selbst bei den für 2005 angenommenen Energiepreisen (vgl. Tab. 1) einzelwirtschaftlich nicht rentabel ist und, selbst wenn dies der Fall wäre, es möglicherweise erst nach 2005 wegen langfristiger Reinvestitionszyklen (zum Beispiel bei Gebäuden und Schienenfahrzeugen) zu einer vollständigen Realisierung wirtschaftlicher Einsparpotentiale kommen könnte. Schließlich aber werden selbst die wirtschaftlichen Energieeinsparpotentiale wegen bestehender Hemmnisse (Marktunvollkommenheiten und institutionelle Rahmenbedingungen) nur teilweise genutzt werden.

Wirtschaftliche Potentiale rationeller Energienutzung in Abhängigkeit vom Energiepreis anzugeben, war lediglich in wenigen Anwendungsbereichen wie im Altbau oder im Neubau möglich (vgl. Abb. 4), andere eher kleine Anwendungsbereiche, zum Beispiel die leistungselektronikgesteuerten Elektromotoren oder Beleuchtung, sind unbedeutend für diese Überlegungen. Diese Mangelsituation hat verschiedene Ursachen:

- Die Hersteller konnten keine Informationen über die Zusatzkosten für besonders energiesparende Fahrzeuge oder Elektrogeräte liefern. Auch die Preisbildung von Fahrzeugen läßt in der Regel keine direkten Rückschlüsse auf veränderte Produktionskosten zu, die auf kraftstoffsparende Maßnahmen zurückzuführen wären. Denn die Kosten der „Extras“ für zum Beispiel Fahrkomfort, Sicherheit und Korrosionsschutz sind so unterschiedlich, daß Preisunterschiede nicht eindeutig auf Unterschiede spezifischer Kraftstoffverbräuche zurückgeführt werden können.
- Bei den Elektrogeräten sind die höheren Preise effizienter Geräte, soweit hierzu Analysen vorliegen, in der Regel durch die eingesparten Stromkosten rentabel. Bei einigen Geräten (Gefrieren, Kühlgefrierkombinationen sowie Spül- und Waschmaschinen) lag der Preis des Gerätes mit dem niedrigsten spezifischen Stromverbrauch gleich auf oder unterhalb des Durchschnittspreises aller Neugeräte, so daß auch Preispolitiken der Hersteller und des Vertriebs die zusätzlichen Aufwendungen für den geringen spezifischen Stromverbrauch nicht mehr erkennbar machen.
- Energiesparende Einrichtungen oder Maschinen dienen häufig mehreren Funktionen, zum Beispiel Wintergärten auch dem Wohnkomfort, Rolläden auch der Verdunkelung oder dem Einbruchschutz, Energiemanagementsysteme auch der Einsparung von Bedienungspersonal oder der besseren Maschinenauslastung. Es ist oft nicht möglich, die jeweiligen Funktionen eindeutig zu bewerten und

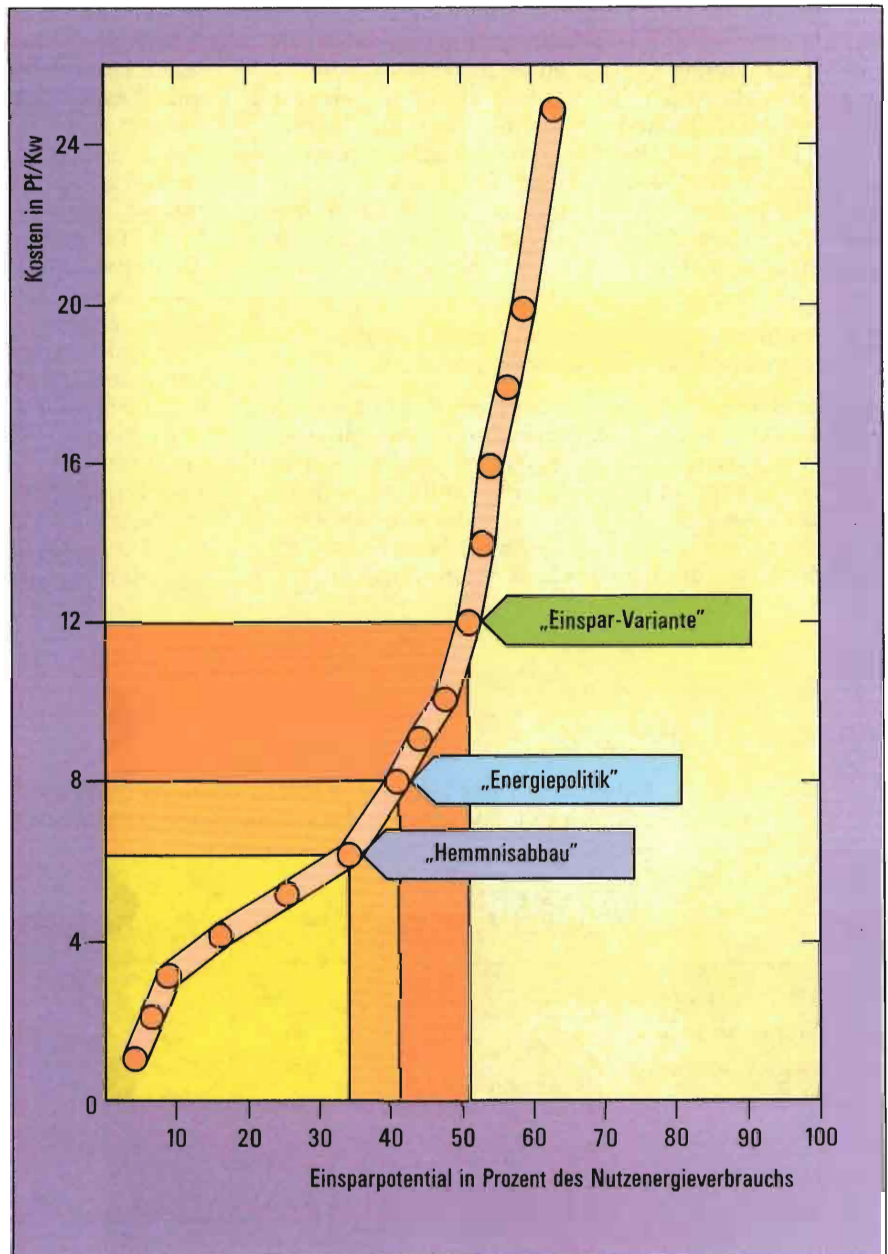


Abb. 4: Grenzkosten von Wärmeschutzmaßnahmen an einzelnen Gebäudetypen im Gebäudebestand

damit auch der energieeinsparenden Funktion eindeutig Kosten zuzuordnen.

- Im Bereich der Produktionsanlagen und -maschinen kann diese Multifunktionalität der Verbesserungen bei Investitionsgütern dazu führen, daß energiesparende Maßnahmen völlig unabhängig von aktuellen Energiepreisen oder -preiserwartungen in neuen Anlagen und Maschinen integriert sind (autonomer energiesparender Fortschritt). Beispielsweise werden Mikroelektronikanwendungen oder neue Werkstoffe deshalb eingesetzt, um Personal oder Hilfsstoffe einzusparen, die Produktqualität anzuheben oder zu garantieren oder Kapitalkosten zu sparen. Daß bei diesen Prozeß-

verbesserungen zugleich Energie rationeller genutzt werden kann, ist ein gern gesehener, aber unbeabsichtigter Nebeneffekt.

- Schließlich ist es für technologisch sehr inhomogene Bereiche wie die gewerblichen Bereiche des Kleinverbrauchs oder die meisten Industriebranchen unmöglich, für tausende von Produktionsverfahren und -maschinen die energietechnischen Verbesserungen einschließlich der jeweils damit verbundenen Mehrkosten zu erheben.

Aus diesen Gründen waren die wirtschaftlichen Energieeinsparpotentiale nur in den seltensten Fällen als Energiepreis-Potentialkurven darstellbar, sondern

nur punktweise und mittelbar anhand von zusätzlichen Informationen abzuschätzen (zum Beispiel durch punktweise Berechnungen unter den Preisannahmen des Jahres 2005 oder durch die Beobachtung, ob und mit welcher Diffusionsgeschwindigkeit die betreffende Technik bereits bei heutigen Energiepreisen eingesetzt wird). Wegen dieser mangelnden Datenverfügbarkeit wird auch verständlich, daß die Angaben von Kosten für Energieeinsparinvestitionen mit erheblichen Unschärfen und Unsicherheiten verbunden sind.

#### 2.4 Formulierung von Entwicklungsvarianten rationeller Energieverwendung bis 2005

Aufgrund dieser Sachlage wurden von den beteiligten Instituten und Unternehmen zunächst zwei Entwicklungsvarianten bis zum Jahre 2005 skizziert, die einerseits energieverbrauchssteigernde Einflüsse berücksichtigen (vgl. Tab.1), andererseits die angesprochenen Hemmnisse in unterschiedlicher Weise und verschiedene Energiepreis-Varianten miteinbeziehen.

– In der „Moderaten“ Entwicklung wurden relativ moderate Preissteigerungen für Brennstoffe und real stagnierende Strompreise (vgl. Tab. 1) sowie eine Energiepolitik unterstellt, die man als die Fortsetzung heutiger Politik bezeichnen könnte. Unter diesen Voraussetzungen nimmt der Endenergiebedarf (zuzüglich der Brennstoffmengen für die industrielle Stromerzeugung) bis 2005 um rund 7 Prozent (rund 530 PJ) zu. Allerdings verläuft die Entwicklung in den einzelnen Verbrauchssektoren sehr unterschiedlich (vgl. Tab. 3). Diese Variante, die zeitlich parallel zur Erarbeitung der Referenz-Entwicklung (vgl. Nr. 1.1) skizziert wurde, unterscheidet sich durch einige Abweichungen, die sowohl auf andere statistische Abgrenzungen (zum Beispiel Einbezug des internationalen Flugverkehrs oder der industriellen Kraft-Wärme-Kopplung teilweise im Energieverbrauch der Industrie) als auch unterschiedliche Rahmenbedingungen (Preise für Energieträger) und Annahmen von Experten zurückzuführen sind.

Tabelle 3

#### Entwicklung des sektoralen Energiebedarfs im Jahre 1987 und 2005 in vier Varianten der rationellen Energieverwendung

Sektoren	2005 in PJ				
	1987 in PJ	„moderat“	„Energie-spar“	„Hemmnis-Abbau“	„Energie-politik“
private Haushalte					
– Raumwärme .....	1 596 <sup>1)</sup>	1 310	896	1 135	990
– Elektrogeräte .....	250	207	217	207	217
– Warmwasser .....	189	143 <sup>2)</sup>	215 <sup>2)</sup>	143	143
Kleinverbrauch .....	1 225	1 278	988	1 140	1 070
Industrie .....	2 289 <sup>3)</sup>	2 593	2 412	2 530	2 470
Verkehr .....	1 991 <sup>4)</sup>	2 531	1 688	2 020	1 781
nicht behandelt <sup>5)</sup> .....	123	135	108	133	120
Zwischensumme für Endenergie-sektoren .....	7 663	8 197	6 524	7 308	6 791
Kraftwärme-Kopplung .....	245	344	1 217	436	436
– Industrie <sup>6)</sup> .....	254	386	653	539	539
– Heizkraftwerke .....	254	386	653	539	539
		Effizienzverbesserung in %			
– Raffinerien .....	205	10 %	20 %	13 %	15 %
– fossil gefeuerte Kondensations-Kraftwerke .....	1 952	0–0,2 % <sup>7)</sup>	2,5–9,9 % <sup>7)</sup>	0–5,7 % <sup>7)</sup>	2,5–7,9 % <sup>7)</sup>

<sup>1)</sup> temperaturbereinigt auf Normaljahr.

<sup>2)</sup> die Werte sind in der Einsparvariante wegen den 94%igen Zentralwasseranteils höher (wegen Solaranlagen) als in der moderaten Variante, wo in 2005 nur eine 50%ige Zentralwarmwasserversorgung angenommen wurde.

<sup>3)</sup> Inklusive Brennstoffe für eigenerzeugten und selbstverbrauchten Strom.

<sup>4)</sup> Inklusive internationalem Flugverkehr von 120 PJ

<sup>5)</sup> dezentrale Warmwasserversorgung mit Holz und Gas, Kraft und Treibstoffe für Militär und Landwirtschaft, Strom für Wärme im Verkehr, Lüftungsenergiebedarf.

<sup>6)</sup> soweit nicht im Industrieenergieverbrauch enthalten.

<sup>7)</sup> je nach Brennstoffeinsatz.

- In der „Energiespar“-Variante wurde aus methodischen Gründen angenommen, daß die bestehenden Hemmnisse rationeller Energienutzung abgebaut sind und sich die Preise für Endenergieträger, das heißt für Brennstoffe und Fernwärme, für das Jahr 2005 um 15,— DM/GJ und die Strompreise um 7 DPf/kWh gegenüber der „Moderaten“-Entwicklung erhöhen. Dies bedeutet eine Erhöhung der Energiepreise gegenüber den Werten der „Moderaten“ Entwicklung um beispielsweise 88 beziehungsweise 73 Prozent beim leichten Heizöl beziehungsweise Gas, rund 140 Prozent beim Gasbezug der Industrie oder um 23 bis 56 Prozent beim Strom, je nach Abnehmergruppe. Außerdem wurde eine Energiepolitik unterstellt, die heute bestehende Hemmnisse rationeller Energienutzung beseitigt. Unter diesen Voraussetzungen liegen die Schätzwerte für den Endenergiebedarf 2005 um knapp 140 GJ (oder rund 15 Prozent) unter den Werten von 1987.

Diese beiden Varianten wurden dann bei der Erstellung dieses Berichts um zwei weitere ergänzt:

- Entsprechend den in Abbildung 1 skizzierten Emissionsminderungspotentialen wurde zunächst unterstellt, daß alle bestehenden Hemmnisse rationeller Energieverwendung durch eine entsprechende Energie- und Verkehrspolitik abgebaut werden. Diese Variante „Hemmnis-Abbau“ unterstellt also weiterhin die in Tabelle 1 angegebene „Moderate“-Entwicklung der Endenergiepreise, aber den Abbau bestehender Hemmnisse, so daß alle rentablen Potentiale rationeller Energieverwendung im Rahmen ihrer üblichen Reinvestitionszyklen realisiert werden. Der Energiebedarf der Endenergiesektoren für 2005 liegt mit insgesamt 7308 PJ um etwa 5 Prozent unter dem Wert von 1987 beziehungsweise um knapp 11 Prozent unter dem Wert für 2005 der moderaten Entwicklung. Diese Differenz von 870 PJ für 2005 wäre demnach als gehemmtes Potential zu interpretieren.
- Der Abbau von Hemmnissen (zum Beispiel fehlende Kenntnisse und Fähigkeiten der Marktteilnehmer, hemmende rechtliche Vorschriften, unzureichende Kostenorientierung von Preisen leitungsgebundener Energieträger, Nutzer-Eigner-Dilemma, (vgl. Nr. 2.6) erscheint unter Anreiz- und Motivationsgesichtspunkten und unter dem Aspekt externer Kosten der Energienutzung nur dann in erheblichem Umfang möglich, wenn Energieverbraucher, Planer, Handwerk und Hersteller durch veränderte Energiepreise Hinweise erhalten, mit der Energie sorgsamer als bisher umzugehen. Um derartige Preisreaktionen der Energienachfrage zu beschreiben, wurden Energiepreissteigerungen zusätzlich zu den in Tabelle 1 genannten Werten bei den Endenergieträgern, das heißt bei den Brennstoffen und Fernwärme, um 5,— DM/GJ und beim Strom um 2 DPf/kWh unterstellt, das heißt nur etwa ein Drittel der in der Energiespar-Variante angenommenen Preissteigerungen. Die Höhe dieses Preisaufschlages für 2005, der linear zwischen Anfang der 90er Jahre und 2005 zunehmen würde und als Steuer- oder Abgabebelastung oder in Kombination mit Energiepreis-

steigerungen auf den Energieweltmärkten interpretierbar ist, wurde aus folgenden Gründen gewählt:

- Bei den Brennstoffen, Mineralölprodukten und Naturgas würde 2005 real wieder das Energiepreinsniveau von 1981/82 erreicht (zum Beispiel leichtes Heizöl: 85 DPf/l in Preisen von 1987)
- Das überschlägig durch dieses Steuer- oder Abgabenmodell errechenbare Geldvolumen von rund 35 Milliarden DM im Jahre 2005 — sieht man einmal von möglichen Preissteigerungen auf den Weltenergiemärkten ab — könnte zur Finanzierung von Investitionsanreizen für CO<sub>2</sub>-mindernde Investitionen, der Transaktionskosten beim Abbau der Hemmnisse sowie zur Finanzierung eines Klimafonds für finanzielle Anreize und Hilfen in Entwicklungsländern verwendet werden.

Der Energiebedarf der Endenergiesektoren liegt in dieser „Energiepolitik“-Variante mit 6790 PJ um 11,5 Prozent unterhalb des Wertes von 1987 oder um 520 PJ unter dem Wert des Jahres 2005 der Hemmnisabbau-Variante. Allerdings kann dieser Wert nicht allein als Preisreaktion der Energieverbraucher interpretiert werden, da gleichzeitig eine veränderte Verkehrspolitik unterstellt wurde, die zu fahrverhaltens- und verkehrsflußbedingten Energieeinsparungen von rund 240 PJ führt (vgl. Tab. 3).

Zur Erläuterung der genannten Energiebedarfszahlen seien im folgenden die wesentlichen Annahmen und Kostenangaben skizziert.

#### 2.4.1 Raumwärme in privaten Haushalten

Die Wohnfläche nimmt in der Periode bis 2005 um 230 Millionen m<sup>2</sup> zu, außerdem werden nach Abriß weitere 220 Millionen m<sup>2</sup> neu gebaut.

- Die Jahresnutzungsgrade der Heizanlagen steigen von durchschnittlich 74 Prozent im Jahre 1987 auf 97 Prozent wegen einer hohen Anzahl von Wärmepumpen und Brennwertkesseln im Jahre 2005 in der Energiespar-Variante. In den übrigen Varianten liegen sie zwischen 83 Prozent (moderat) und 90 Prozent (Energiepolitik). Die entsprechenden Zusatzinvestitionen gegenüber der moderaten Variante mit quasi autonomem energie-technischem Fortschritt werden — je nach Gebäudegröße, Gebäudetyp und regional unterschiedlichen Installationskosten — zwischen 1,6 DPf/kWh (Mehrfamilienhaus) und 15 DPf/kWh (Einfamilienhaus, Brennwertkessel) angegeben. Insgesamt werden die Zusatzkosten für die Heizanlageninvestitionen in der Energiespar-Variante auf 15 Milliarden DM bis 2005 beziffert (vgl. Tab. 4). Der spezifische Endenergiebedarf würde von 217 kWh/m<sup>2</sup>a im Jahre 1987 auf knapp 165 kWh/m<sup>2</sup>a im Jahre 2005 infolge der Heizanlagenverbesserung zurückgehen (in der Hemmnisabbau- beziehungsweise Energiepolitik-Variante Rückgang auf 185 bzw 176 kWh/m<sup>2</sup>a).
- Für die Wärmedämmmaßnahmen im Altbaubestand wurde unterstellt, daß sie mit anstehenden In-

standsetzungs- und Erneuerungsmaßnahmen am jeweiligen Bauteil gekoppelt werden können. Deshalb gehen nur die Mehrkosten für die Energieeinspar-Investitionen in die Rechnung ein. Wegen dieser Koppelung an die Erneuerungszyklen von 25 bis 40 Jahren ist die Umsetzungsgeschwindigkeit begrenzt. Daher könnte das wirtschaftliche Energieeinsparpotential bis zum Jahr 2005 erst zu 60 Prozent ausgeschöpft sein. Hiervon werden aber wegen Denkmalschutz und anderen Gegebenheiten (Fachwerkwände, schindelverkleidete Hauswände) nur jeweils zwei Drittel der jährlich zur Sanierung anstehenden Gebäude realisiert. Die hierfür erforderlichen gesamten Investitionskosten wurden mit 85 Milliarden DM für die Wärmedämmmaßnahmen in der Energiespar-Variante veranschlagt. Rechnet man mit einer durchschnittlichen Nutzungsdauer von 35 Jahren, so kostet die eingesparte Endenergie im Durchschnitt 8,0 DPf/kWh. Der spezifische Endenergiebedarf sinkt für diese 40 Prozent des Altbaubestandes auf 85 kWh/m<sup>2</sup>a.

- Für den nicht-sanierten Altbaubestand wurde für die Energiepolitik- und die Einspar-Variante unterstellt, daß in 6,5 Millionen Wohnungen, die nicht an den Außenwänden wärmetechnisch sanierbar sind (unterstellter Anteil 33 Prozent) oder noch nicht im Reininvestitionszyklus an der Reihe waren, bei Fenstersanierungen Wärmeschutzglas und bei Wohnungsrenovierungen zum Teil Innenwärmedämmung mit einem Aufwand von 8,5 Milliarden DM bis 2005 und einer Einsparung von 30 PJ/a investiert werden. Diese Investitionen führen – zusammen mit den Heizanlagensanierungen – zu spezifischen Endenergieverbräuchen im nicht-sanierten Altbaubestand von 159 beziehungsweise 168 kWh/m<sup>2</sup>a in der Einspar- beziehungsweise Energiepolitikvariante.
- Für den Neubau wurden in der moderaten Entwicklung ein Nettoheizenergiebedarf von 115 kWh/m<sup>2</sup>a für Einfamilienhäuser und 50 kWh/m<sup>2</sup>a für Mehrfamilienhäuser mit Mehrkosten von 40 bis 50,– DM/m<sup>2</sup> Wohnfläche unterstellt und für die Einspar-Variante 40 beziehungsweise 25 kWh/m<sup>2</sup>a und mit spezifischen Mehrkosten von 200,– bis 250,– DM/m<sup>2</sup> Wohnfläche gerechnet. Hieraus errechnet sich ein zusätzlicher Investitionsaufwand von rund 108 Milliarden DM bis 2005 für die 450 Millionen m<sup>2</sup> Neubau. Der Kapitaldienst (bei 5,4 Prozent/a aus 4 Prozent Realzins bei 35 Jahren) beläuft sich auf 17 DPf/kWh in der Einsparvariante (auf 9 beziehungsweise 15 DPf/kWh in der Hemmnisabbau- beziehungsweise Energiepolitik-Variante, (vgl. Tab. 4).

Über die Frage, inwieweit die Einsparungen der Energiespar-Variante im Altbaubestand und im Neubau erreichbar sind oder eher die Einsparungen der Hemmnisabbau- oder Energiepolitik-Variante als durchsetzbar zu bezeichnen sind, gab es in den Diskussionen um diesen Bericht unterschiedliche Einschätzungen. Die für den sanierten Altbaubestand erreichten spezifischen Heizenergieverbräuche würden selbst in der Einspar-Variante mit 85 kWh/m<sup>2</sup>a den für Schweden ab 1990 vorgeschriebenen Standard für Neubauten um mehr als ein Drittel übersteigen. Der

Wert für Neubauten der Energiepolitik-Variante liegt mit dem schwedischen Standard gleich, während der Wert für die Einspar-Variante den schwedischen Standard um 20 bis 25 Prozent unterschreitet. Die Zusatzkosten für verbesserten Wärmeschutz von mehr als 200,– DM/m<sup>2</sup> liegen eher am oberen Ende der bisherigen Erfahrungen. Die Frage, inwieweit durch verstärkte Wärmedämmung die Herstellung der Baumaterialien und technischen Anlagen zu einem zusätzlichen Energieaufwand führt, der die zusätzlich eingesparte Heizenergie des Gebäudes wieder aufwiegen könnte, wurde zwar nicht in der entsprechenden Einzelstudie behandelt, aber erste Fallbeispiele und überschlägige Berechnungen führen zu dem Ergebnis, daß der zusätzliche Energieaufwand für ein Niedrigenergiehaus des neuen schwedischen Standards in etwa 12 bis 18 Monaten des Heizbetriebes im Gebäude wieder eingespart wird.

#### 2.4.2 Elektrogeräte und Warmwasser

- Die Energiebedarfswerte für die Elektrogeräte der Einsparvariante und der Energiepolitikvariante von 217 PJ enthalten auch Gasverbrauchszahlen von 42 PJ infolge von Substitutionsprozessen beim Waschen, Kochen und Backen. Es wird in beiden Varianten unterstellt, daß 20 Prozent des Strombedarfs beim Waschen substituiert werden und die Marktsättigung von Elektroherden von heute 76 Prozent nicht weiter steigt, sondern auf 55 Prozent im Jahre 2005 zurückgeht. Kostenangaben wurden in der Einzeluntersuchung A 1.3 nicht gemacht. Allerdings ist aus der Literatur bekannt, daß bei vielen Elektrogeräten und der Beleuchtung die unterstellten Energieeffizienzverbesserungen heute rentabel sind. So können bei Spül- und Waschmaschinen sowie bei Kühl-Gefrierkombinationen ohne Mehrinvestitionen für die Geräte 50 bis 70 kWh pro Jahr eingespart werden. Bei Wäschetrocknern müssen durchschnittlich 28,– DM (Einsparung 32 kWh/a), bei Kühlschränken 37,– DM (Einsparung 49 kWh/a) und bei Gefriergeräten 58,– DM (Einsparung 134 kWh/a) Mehrinvestitionen angesetzt werden. Unter Berücksichtigung der Bestandentwicklung der oben aufgeführten Elektrogeräte ergibt sich in der Summe eine Energiekostenentlastung der Haushalte von über 1,2 Milliarden DM im Jahr 2005. Im Bereich Beleuchtung können verstärkt Energiesparlampen eingesetzt werden. Bei einem Investitionsvolumen von etwa 800 Millionen DM (Annahme: Preis pro Lampe unter 10,– DM, Vorschaltgeräte werden im Leuchtenkörper integriert) kann eine Stromkostensenkung um weitere 750 Millionen DM bei den Haushalten erwartet werden. Hierbei wurden durchschnittlich drei Energiesparlampen pro Haushalt als realisierbare Marktpenetration angenommen; die jährliche Betriebszeit der Lampen liegt zwischen 500 und 1000 h
- Der Warmwasserbereich hat in der Sparvariante einen deutlich erhöhten Energiebedarf von 215 PJ, weil die Warmwassererzeugung mit 96 Prozent zentral erfolgt, um langfristig auf solare Warmwassererzeugung umsteigen zu können (übrige Vari-

anten: 50 Prozent zentral mit 147 PJ). Auch hier wurde in der Einzeluntersuchung nichts zu den Kosten gesagt.

### 2.4.3 Kleinverbrauch und Industrie

Beim Vergleich der Energiebedarfszahlen der „Moderaten“ und „Energiespar“-Variante fällt auf, daß der Preiseinfluß auf die Energienachfrage in Kleinverbrauch und Industrie relativ gering zu sein scheint und – abgesehen von der Grundstoffindustrie und den prozeßwärmeintensiven Branchen des Kleinverbrauchs – der „autonome“ energiesparende technische Fortschritt eine vergleichsweise große Bedeutung hat, insbesondere in der Industrie. Hinzu kommt, daß der Abbau bestehender Marktunvollkommenheiten und hemmender institutioneller Rahmenbedingungen bereits einen Teil möglicher Energieeinsparpotentiale realisieren könnte, wenn man die Entwicklung der Hemmnisabbau-Variante im Vergleich zu der moderaten Variante betrachtet (Kleinverbrauch: –10,8 Prozent; Industrie: –2,4 Prozent).

Die relativ geringen Preiselastizitäten für Kleinverbraucher von 0,20 beziehungsweise 0,18 und für das verarbeitende Gewerbe von 0,08 bis 0,065 für die beiden Varianten „Energiepolitik“ und „Energiespar“ sind zum einen darin begründet, daß in diesen Verbrauchssektoren die Einflüsse eines autonomen energiesparenden technischen Fortschritts durch hohe Energierationalisierungen bei Erhaltungs- oder Erweiterungsinvestitionen von Anlagen und Gebäuden dominieren. Zum zweiten wurde der Hemmniseffekt vorher analytisch herausgerechnet, der in den verfügbaren empirischen Untersuchungen zu Preiselastizitäten nie separiert wurde. Will man deshalb die Preiselastizitäten dieses Berichtes einem Vergleich mit empirischen Werten unterziehen, so ergeben sich nach Einbezug des Effektes des Hemmnisabbaus Werte von 0,5 beziehungsweise 0,28 für den Kleinverbrauch und von 0,15 und 0,10 für das verarbeitende Gewerbe. Schließlich mag aus der gewählten Methode einer stark technologisch orientierten Analyse, die nicht von einer zusätzlich möglichen ökonomischen Analyse ergänzt wurde, eine gewisse Unterschätzung der Energieeinsparmöglichkeiten resultieren. Dieser Einwand bedeutet, daß entweder bei den angenommenen Energiepreissteigerungen die Energieeinsparungen in der Industrie höher ausfallen würden oder bei angestrebten Energieeinsparungen in der genannten Höhe die Preissteigerungen geringer gewählt werden könnten.

Weitere Energieeinsparmöglichkeiten sind in den raumwärmeintensiven Sektoren des Kleinverbrauchs gegeben, weil hier die Energieeinsparpotentiale mit 30 Prozent in der Einsparvariante nicht so hoch angesetzt wurden wie bei den privaten Haushalten (knapp 40 Prozent).

Zu den Mehraufwendungen für die zusätzlich eingesparten Energiemengen wird in den Einzelberichten lediglich für die raumwärmeintensiven Sektoren des Kleinverbrauchs eine Angabe von 24 Milliarden DM für den Fall der Energiesparvariante gemacht (vgl. Tab. 4). Diese Angaben, die für Brennstoffe und

Stromeinsparinvestitionen getrennt ausgewiesen sind, wurden dann für die anderen Varianten geschätzt, wobei steigende Grenzkosten unterstellt wurden. Für die Industrie und die übrigen Sektoren des Kleinverbrauchs werden zwar als obere Grenzen anlegbare Investitionskosten im Gesamtbericht zum Studienschwerpunkt A.1 genannt, aber die Unsicherheiten werden doch aufgrund der unzureichenden Informationen über durchschnittliche Nutzungszeiten und energiepreisunabhängige technische Fortschritte als zu groß eingeschätzt, um die Werte in diesem Bericht aufführen zu können.

### 2.4.4 Verkehr

Fast alle Angaben zum Verkehr wurden dem Bericht zum Studienschwerpunkt A.6 entnommen (vgl. Nr.8). In der „Moderaten“ Variante weist der Verkehr bis 2005 noch einen um 27 Prozent steigenden Energiebedarf auf, der mit den Verkehrsleistungen des Referenz-Szenarios von A.6 und den spezifischen Energieverbräuchen der Referenzentwicklung von A.1 berechnet wurde. In der „Energiesparvariante“ verringert sich der Energiebedarf für 2005 um 15 Prozent gegenüber 1987. Dabei wird nicht nur die Preispolitik als Mittel zur Zurückdrängung des Straßenverkehrs (Parkgebühren, Umwandlung der Kilometerpauschale, Kraftstoffsteuern) und des Luftverkehrs (Kraftstoffsteuer, Luftsicherungskosten) eingesetzt, sondern es werden eine langfristig wirkende Politik zur Siedlungsentwicklung sowie verhaltensverändernde Maßnahmen unterstellt, darunter unter anderem eine Flächenreduktion für den fließenden und ruhenden Straßenverkehr, Geschwindigkeitsbegrenzungen (Tempo 100/80/30 km/h), eine Verbesserung bezüglich Reisegeschwindigkeit und Komfort der öffentlichen Transportmittel sowie eine stärkere Kontrolle von Vorschriften (vgl. Nr. 8).

In der „Hemmnisabbau“-Variante wird unterstellt, daß alle fahrzeugtechnischen Einsparmöglichkeiten der Reduktionsvariante aus A.6 umgesetzt werden:

- Verringerung des Gewichtes von Fahrzeugen,
- Verringerung von Luft- und Rollwiderstand bei Fahrzeugen,
- Bremsenergie rückgewinnung bei Straßen- und Schienenfahrzeugen und
- verbesserte Getriebe und Motoren sowie Triebwerke.

Weiterhin werden Änderungen des „modal split“ unterstellt, die im Jahre 2005 zu einer Verlagerung von 64 Milliarden Personenkilometer vom PKW- und Luftverkehrssektor zu bodengebundenen öffentlichen Verkehrsmitteln führen. Die hierzu erforderlichen Maßnahmen beinhalten eine Reihe von Maßnahmenpaketen zur Internalisierung externer Kosten des Straßen- und Luftverkehrs und zur Förderung des schienegebundenen Verkehrs.

Die Einsparquoten der Energiepolitik-Variante unterscheiden sich wegen einer geringeren Eingriffstiefe verkehrspolitischer Maßnahmen um insgesamt 5 Prozent gegenüber der Energiespar-Variante. Kosten für

die zusätzlichen Energieeinsparmaßnahmen im Verkehrsbereich wurden nicht genannt.

#### 2.4.5 Umwandlungssektor

Im Bereich der industriellen Kraft-Wärme-Kopplung und der Heizkraftwerke geht man davon aus, daß zuwachsende Kraft-Wärme-Kopplungs-Potentiale überwiegend im elektrischen Leistungsbereich weit unter 100 MWel erreicht werden und hierbei erdgasgefeuerte Gasturbinen, Kombiprozesse und die Motorentechnik dominieren. Die durch diese Techniken erreichten Steigerungen der Stromkennzahl und der Abbau von Hemmnissen sind Hauptgründe einer erneuten Zunahme von Kraft-Wärme-Kopplungs-Anlagen (KWK). Zusätzliche Potentiale werden durch viele direkt mit Heißgas arbeitende Produktionsprozesse (Trocknen, Rösten) sowie durch einen erheblichen Schub von KWK-gestützten Absorptionskälteanlagen ermöglicht. In der Energiespar-, der Energiepolitik- und der Hemmnisabbau-Variante wurde in unterschiedlichem Umfang eine neue Form stromwirtschaftlicher Zusammenarbeit und eine Fachaufsicht unterstellt, die bestehende Hemmnisse der KWK-Anwendung weitgehend abbauen. Insbesondere in der Energiespar-Variante wird angenommen,

- daß sich die Energiewirtschaft sehr bewußt auf das Angebot von Energiedienstleistungen konzentriert, ihr Verhältnis zu Eigenstromerzeugern ändert und sich beispielsweise intensiv in Contracting-Unternehmen für industrielle und gewerbliche KWK-Anlagen engagiert,
- daß die Fachaufsicht durch die Rechtslage und das Personal soweit gestärkt wird, daß sie das Konzept der Minimalkosten-Strategie (Least Cost Planning)

gegenüber den Strom und Fernwärmeunternehmen durchsetzen kann und vermeiden kann, daß Überkapazitäten im Großkraftwerksbereich weiterhin als „Sachzwang“ gebaut werden und dann als Gegenargument für KWK-Investitionen wirksam sein können.

In der Energiespar-Variante wird die industrielle KWK gegenüber der Energiepolitik-Variante noch um weitere 250 PJ Wärme ausgebaut. Davon werden aber nur rund 50 PJ im verarbeitenden Gewerbe eingesetzt, während das übrige Wärmeangebot einen Teil des Prozeßwärme- und Kältebedarfs im Kleinverbrauch deckt. Die Investitionen betragen für die Energiepolitik- beziehungsweise Hemmnisabbau-Variante 44 Milliarden DM bis 2005 und für die Energiespar-Variante 70 Milliarden DM einschließlich der Investitionen für die Fernwärme und Verbesserungsinvestitionen bei den Raffinerien (vgl. Tab. 4). Rentabilitätsrechnungen wurden wegen der Fülle der notwendigen Annahmen und unterschiedlichen Anlagenanwendungen nur in grober Form durchgeführt (vgl. Kapitel 5, Nr. 1.2). Wenngleich bei heute bestehenden Kondensationskraftwerken nur geringe Effizienzverbesserungen zu erwarten sind, so werden doch infolge von Ersatz- und Erweiterungsinvestitionen die durchschnittlichen spezifischen Brennstoffeinsätze zur Kondensationsstromerzeugung um einige Procente – je nach Kraftwerkstyp und Variante – reduziert (vgl. Tab. 3). Größere und prinzipiell mögliche Wirkungsgradverbesserungen (zum Beispiel bei Braunkohle- und Steinkohlekraftwerken) werden nur zum Teil realisiert, weil in den Szenarien die Braun- und Steinkohleverstromung zwischen 1 Prozent (Braunkohle im Kernenergieausstiegs-Fall) und 66 Prozent (Braunkohle im Kernenergieausbau-Fall)

Tabelle 4

#### Zusätzliche Investitionsvolumen bis 2005 und Kapitalkosten für Maßnahmen rationeller Energieverwendung für die drei Varianten „Hemmnisabbau“, „Energiepolitik“ und „Energiespar“

Sektor	zusätzliches Investitionsvolumen bis 2005 in Mrd. DM			Kapitalkosten DPf/kWh		
	Hemmnisabbau	Energiepolitik	Energiespar	Hemmnisabbau	Energiepolitik	Energiespar
Raumwärme, private Haushalte						
○ Heizanlagen <sup>1)</sup> . . . . .	3	10	15	3,5	4,5	6,0
○ Altbau-Wärmeschutz . . . . .	50	68	94	5,2	6,0	7,6
○ Neubau . . . . .	27	85	108	9,3	15,0	17,0
Raumwärmeintensive Sektoren des Kleinverbrauchs <sup>2)</sup>						
○ brennstoffseitig . . . . .	2,5	4,2	7	3,0	3,4	4,0
○ stromseitig . . . . .	6,0	10,7	17	19	22	26
Elektrogeräte, Beleuchtung <sup>3)</sup> . . . .	2,6	2,6	2,6	3,2	3,2	3,2
Kraft-Wärme-Kopplung einschließlich Fernwärme und Raffinerien . .	43,5	43,5	70	k. A.	k. A.	k. A.

<sup>1)</sup> ohne Wärmepumpen

<sup>2)</sup> Handel, Banken, Versicherungen, andere private Dienstleistungen, Gebietskörperschaften

<sup>3)</sup> ohne Kochen/Backen, Fernsehen und elektrische Warmwasserbereitung



abnimmt (vgl. Kapitel 5, Nr. 1.2 bis 1.4) und mit zunehmendem Kapazitätsabbau Erneuerungsinvestitionen entfallen.

## 2.5 Die Rolle der rationellen Energieverwendung zur Verminderung klimarelevanter Emissionen: Erste Hinweise für die Energie- und Umweltpolitik

Zusammenfassend läßt sich zu Erwartungspotentialen im Jahre 2005 für die rationelle Energienutzung folgendes feststellen: Wenn der Energieverbrauch in den Endenergiesektoren in der moderaten Entwicklung bis 2005 um 6,5 Prozent zunimmt und die CO<sub>2</sub>-Emissionen einschließlich der Einsparungen durch verstärkte KWK-Anwendung im Umwandlungssektor lediglich um 4 Prozent wachsen, so stellt sich die Frage, welcher Einfluß hierbei der rationellen Energienutzung zuzuschreiben ist. Würde sich strukturell und technologisch bei den Energieverbrauchern nichts ändern, so wären Energiebedarf und CO<sub>2</sub>-Emissionen mit dem angesetzten Wirtschaftswachstum um gut 50 Prozent gewachsen (vgl. Abb. 5). Berücksichtigt man aber die strukturellen Effekte, daß

- die Industrie um 5 Prozent-Punkte langsamer wächst als die Gesamtwirtschaft,
- die weniger energieintensiven Industriebranchen überdurchschnittlich zum Industriedurchschnitt wachsen,
- sich Sättigungseffekte beim privaten Konsum und bei Infrastrukturinvestitionen abzeichnen,

dann wäre ohne rationellere Energieverwendung noch ein Energiemehraufwand von rund 2 300 PJ, das heißt von etwa 30 Prozent notwendig gewesen („frozen efficiency“-Betrachtung).

Die Differenz zwischen 2 300 PJ und 530 PJ (Zuwachs des Energieverbrauchs 2005 der moderaten Entwicklung gegenüber 1987) ist somit der Energieeinsparung bis zum Jahr 2005 zuzurechnen, das heißt, bezogen auf das Jahr 1987 werden in der moderaten Entwicklung rund 1 780 PJ durch rationelle Energienutzung, also rund 1,5 Prozent pro Jahr eingespart.

Die Unterschiede der Ergebnisse für die beiden Varianten „Moderat“ und „Energiespar“ für das Jahr 2005 lassen sich als möglicher Handlungsspielraum interpretieren, der der Energiepolitik zur Verfügung steht, um durch rationelle Energieverwendung die klimarelevanten Emissionen zu beeinflussen. Die Energiebe-

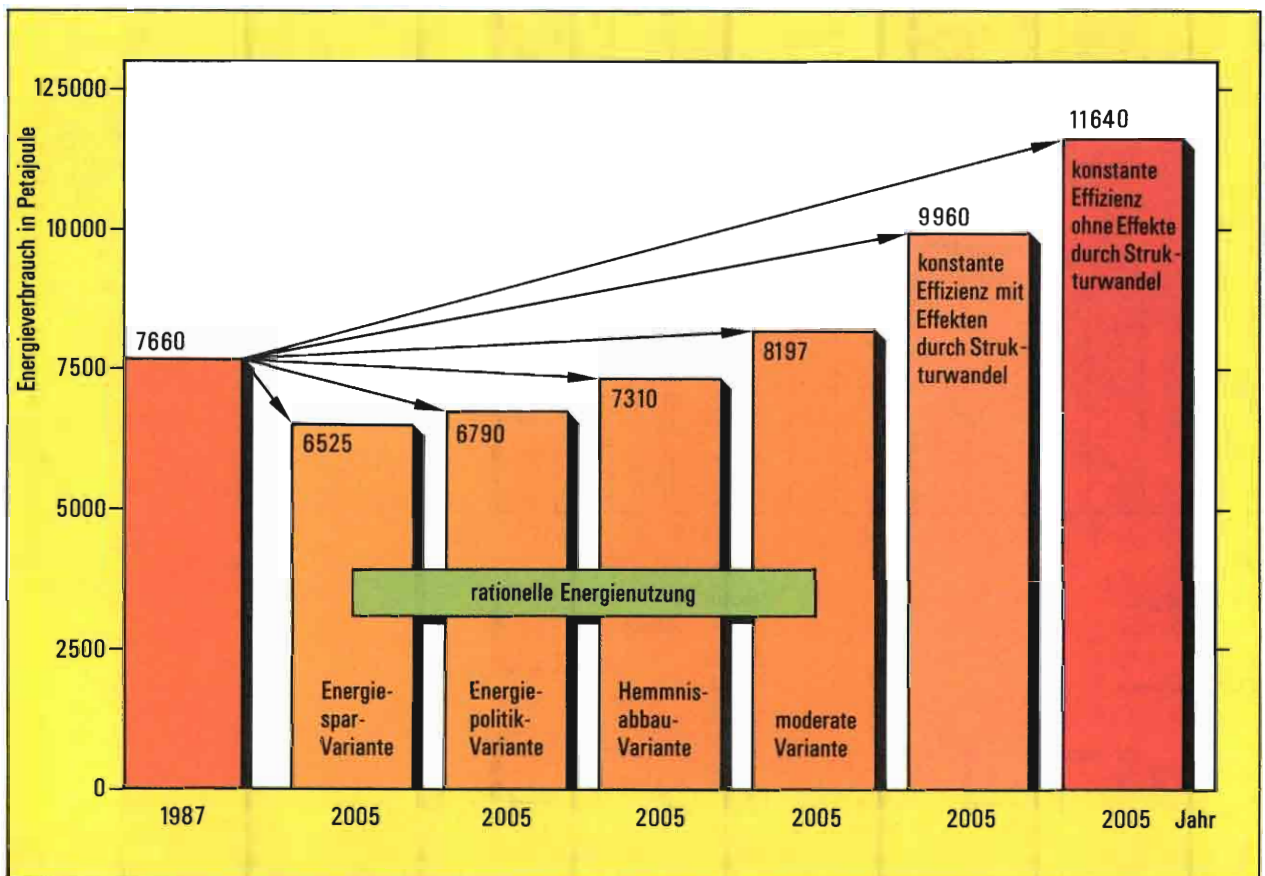


Abb. 5: Entwicklung des Energieverbrauchs der vier Endenergiesektoren 1987 bis 2005 in Abhängigkeit der Varianten „Moderat“, „Hemmnisabbau“, „Energiepolitik“ und „Energiespar“

darfzahlen der zwei Varianten führen zu einer Differenz von 1670 PJ, das heißt einer Einsparung von rund 20 Prozent bezogen auf den Wert der moderaten Entwicklung. Bei den Emissionsmengen führt dies zu folgenden Ergebnissen (vgl. Abb. 6):

- In der „Moderaten“ Entwicklung erhöhen sich die CO<sub>2</sub>-Emissionen ohne Substitution unter den Energieträgern um etwa 50 Millionen Tonnen und unter Einschluß der Emissionsminderungspotentiale im Stromerzeugungs- und Raffineriebereich um circa 25 Millionen Tonnen, das heißt um knapp 3,5 Prozent bezogen auf 1987. Dagegen nehmen die CO<sub>2</sub>-Emissionen in der Einsparvariante um 48

Millionen Tonnen und unter Einschluß der KWK- und Einsparpotentiale der Stromerzeugung und Raffinerien um rund 100 Millionen Tonnen ab. Insgesamt entsteht ein Handlungsspielraum für die Energiepolitik von etwa 18 Prozent bei den CO<sub>2</sub>-Emissionen, oder ein Verminderungspotential um jährlich 1 Prozent.

- Der Handlungsspielraum bezüglich der Methan-Emissionen (CH<sub>4</sub>) ist bei den Endenergiesektoren rund 14 Prozent, der in den vorgelagerten Bereichen dadurch wesentlich erweitert wird, daß bisher nicht genutztes Grubengas in weitaus höherem Maße ebenso wie Deponiegas in Blockheizkraft-

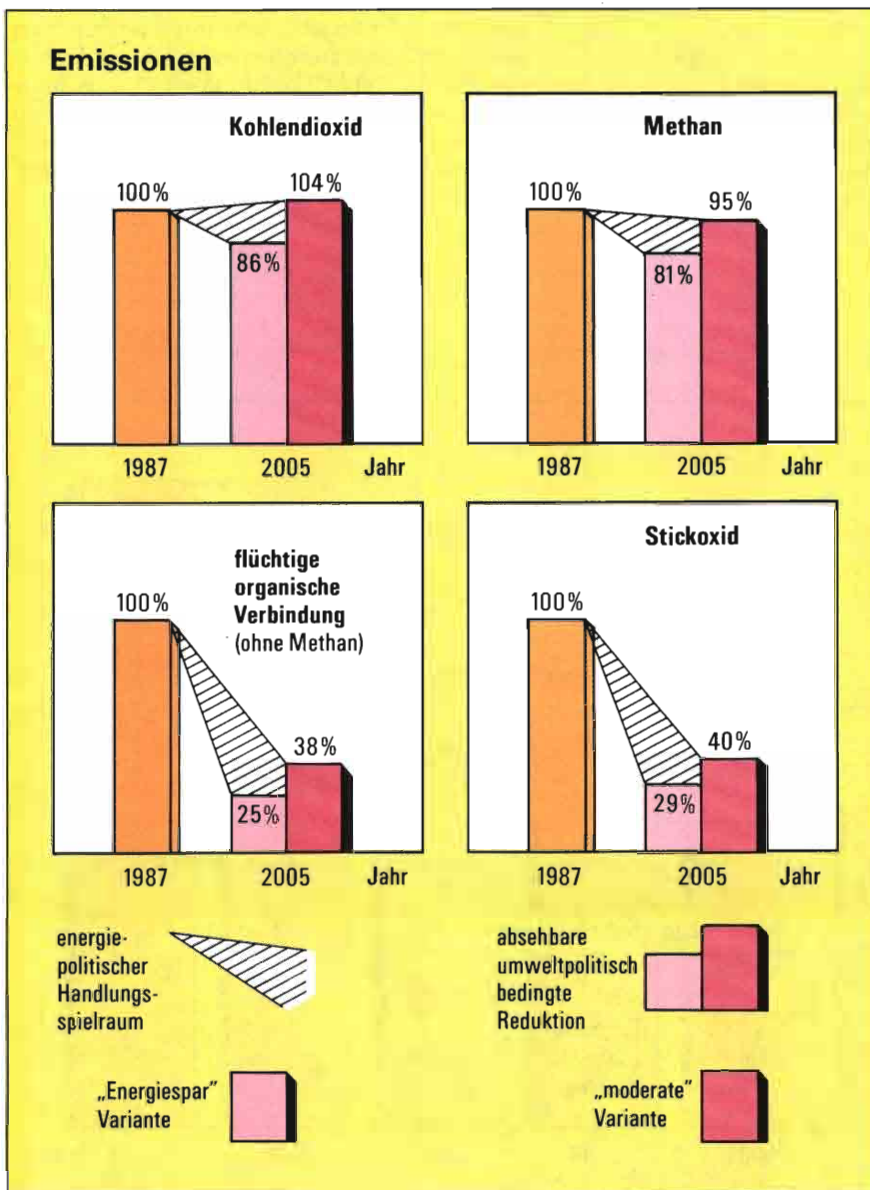


Abb. 6: Mögliche Veränderungen (nur durch rationelle Energienutzung) der direkten und indirekten klimarelevanten Emissionen 1987 und 2005 unter den Bedingungen der zwei Varianten „Moderat“ und „Energiespar“

werken oder als Sekundärluft in Kesselfeuerungen mitverbrannt werden kann.

- Die Stickoxid-Emissionen (NO<sub>x</sub>) vermindern sich in der „Moderaten“ Variante um 1,19 Millionen Tonnen, das heißt um 43 Prozent bis 2005. Dieser starke Rückgang ist im wesentlichen auf die Rauchgasreinigung bei Kesselanlagen und die völlige Marktdurchdringung der Otto-PKW mit geregelter Dreiweg-Katalysator zurückzuführen. In der Energiesparvariante wurden nur die Emissionsfaktoren der Otto-PKW geringfügig geändert, so daß die weitere Verminderung um 300000 Tonnen im Verkehrsbereich sowohl der rationellen Energienutzung als auch dem veränderten modal split und der um 10 Prozent reduzierten motorisierten Verkehrsleistung zuzuschreiben ist (zu weiteren Maßnahmen im Verkehrsbereich vgl. Nr. 8).
- Die flüchtigen organischen Verbindungen (ohne Methan, NMVOC) reduzieren sich in der „Moderaten“ Variante — ebenfalls aufgrund der emissionsseitigen Verbesserungen, insbesondere der Einführung des Katalysators — um 675000 Tonnen oder 62 Prozent bis 2005. Die Energiesparvariante ergibt bei konstanten Emissionsfaktoren, aber auch bei verbesserter Rückhaltung der Verdampfungsemissionen im PKW-Bereich, eine weitere Verminderung der NMVOC-Emissionen um knapp 190000 Tonnen, zu der sowohl die rationelle Energienutzung als auch der veränderte modal split und die geringere Verkehrsleistung beitragen.

Bei diesen Ergebnissen ist allerdings zu berücksichtigen, daß kleinere Substitutionen im Bereich Raumwärme und Warmwasserbereitung zugunsten des Erdgases integriert sind. Je nach Variante führen diese Effekte zu einer CO<sub>2</sub>-Emissionsminderung von 3 bis 4 Millionen Tonnen, das heißt von 0,5 Prozentpunkten.

Insgesamt zeigt sich, daß

- die Ergebnisse für die CO<sub>2</sub>-Emissionen die geringsten Verminderungspotentiale ausweisen, weil emissionsmindernde Maßnahmen für diesen Schadstoff schwer möglich sind und wenn, dann wohl nur in stationären Großanlagen des Umwandlungssektors (vgl. Nr. 7),
- man kann für die übrigen klimarelevanten energiebedingten Schadstoffe davon ausgehen, daß bereits die ergriffenen oder absehbaren Umweltschutzmaßnahmen ausreichen, um das Reduktionsziel von Toronto für 2005 deutlich einzuhalten.

## 2.6 Hemmnisse rationeller Energieverwendung und Maßnahmen zu ihrer Überwindung

Aufgrund bestehender Marktunvollkommenheiten und hemmender administrativer Rahmenbedingungen werden die wirtschaftlichen Energieeinsparpotentiale in den einzelnen Energieverbrauchssektoren nur zum Teil realisiert. Dieser Tatbestand wurde durch die Unterscheidung in die „Moderate“ und die „Hemmnisabbau“ — beziehungsweise die „Energie-

politik“-Variante beschrieben. Deshalb muß es Ziel nicht nur einer klimabewußten, vorsorgenden Energiepolitik, sondern einer allgemeinen Wirtschaftspolitik sein, diese ungenutzten Potentiale durch Abbau der Hemmnisse zu realisieren. Im folgenden sind zunächst die wesentlichen, eher sektorübergreifenden Hemmnisse aufgeführt (vgl. Abb. 7), bevor Maßnahmen zu ihrer Überwindung genannt werden.

### 2.6.1 Zielgruppenübergreifende Hemmnisse und Maßnahmen

- Ein zentrales Hemmnis für rationelle Energienutzung ist der Mangel an energietechnischen Kenntnissen und der fehlende Marktüberblick in den meisten Haushalten, in kleinen und mittleren Unternehmen sowie Gebietskörperschaften, aber auch bei Planern, Architekten, Händlern und Handwerkern. Deshalb bedarf es gezielter Maßnahmen, den Kenntnisstand der genannten Zielgruppen durch Fort- und Weiterbildungsmaßnahmen sowie — langfristig — durch eine verbesserte Ausbildung auf das erforderliche Niveau zu bringen. Außerdem muß die Informationspolitik selbst bewußter darauf ausgerichtet werden, die privaten Haushalte und die mittelständischen Unternehmen sowie die Gebietskörperschaften zur Fort- und Weiterbildung sowie zur Verbesserung ihres Marktüberblicks zu motivieren.

In Fällen, wo Fortbildung zu aufwendig wäre oder aus anderen Gründen nicht realisierbar ist, hat die Beratung durch Dritte eine zentrale Bedeutung. Insbesondere Vor-Ort-Beratung und Vor-Ort-Messungen bieten den Vorteil individuell angepaßter Maßnahmevorschläge und haben hohe Realisierungsquoten. Die Subventionierung von Beratungsleistungen und Beratersvermittlung hat aufgrund empirischer Erhebungen wesentlich bessere Kosten-Nutzen-Relationen als die Subventionierung von Investitionen. Insbesondere sind kostenlose Initialberatungen für Unternehmen oder Gebietskörperschaften sehr wichtig, um die Investoren auf rentable Investitionsmöglichkeiten aufmerksam zu machen.

- Private Haushalte sowie kleine und mittlere Unternehmen schrecken bei energiesparenden Investitionen sehr häufig vor der Kreditfinanzierung zurück. Deshalb sind für diese Zielgruppen Aufklärungsmaßnahmen (zum Beispiel durch Fachverbände, Innung, Banken, Bausparkassen) zur Kreditfinanzierung bezüglich energiesparender Investitionen notwendig.
- Wärmeverluste werden von vielen Energiekonsumenten nicht wahrgenommen. In ähnlicher Weise sehen Fahrer von Kraftfahrzeugen nicht den Zusammenhang zwischen Fahrverhalten (insbesondere Beschleunigungsverlusten) und Kraftstoffverbrauch. Auch die periodische und pauschalisierte Abrechnung von Energiekosten leitungsgebundener Energieträger entkoppelt den Zusammenhang zwischen Energiekonsum und -kosten. Diese genannten Faktoren führen zu energieverschwenderischem Verhalten. Abhilfe könnte durch die Entwicklung neuer und kostengünstiger

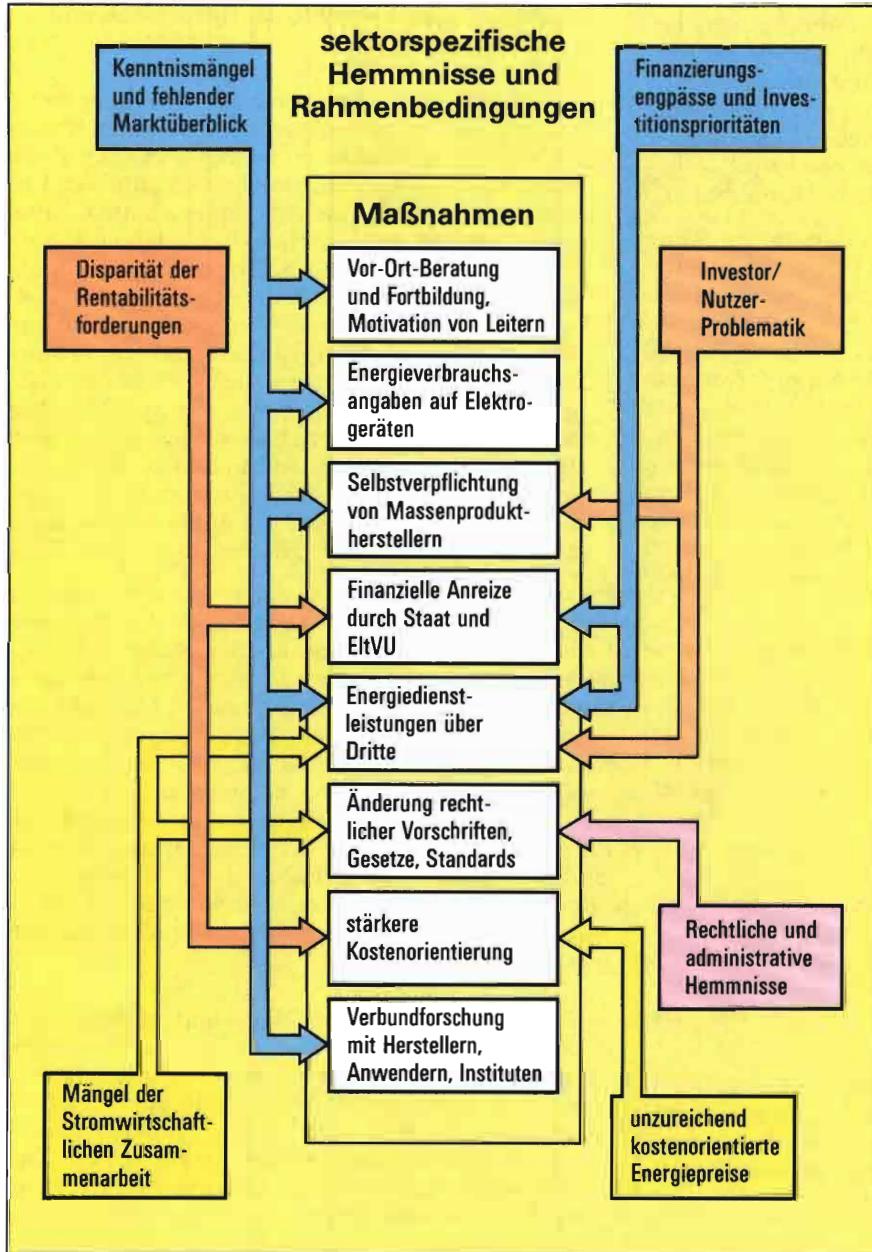


Abb. 7: Schema zu den Hemmnissen und Rahmenbedingungen sowie den Maßnahmen zur rationellen Energienutzung

Meß- und Anzeigergeräte geschaffen werden, die von Energieversorgungsunternehmen zum Teil auch kostenlos ausgeliehen werden sollten.

- Die unzureichende Kostenorientierung der Preise und Tarife leitungsgebundener Energieträger ist ein weiteres Hemmnis. Ob weitere Novellierungen der Tarifordnungen sowie eine intensivere Prüfung der Kostenorientierung von Preisen und Tarifen durch die Fachaufsicht notwendig sind, wurde von den Autoren unterschiedlich eingeschätzt.
- Die Investor/Nutzer-Problematik ist zwar ein häufiges Beispiel im Mietwohnungsbau, aber eine zunehmende Bedeutung hat dieses Hemmnis bei Geschäftsgebäuden mit Kaltmiete, Gebäuden der öffentlichen Hand, wo häufig der Investor eine andere Gebietskörperschaft ist als der Betreiber, und beim Leasing stationärer Anlagen. Zur Erhöhung der Markttransparenz sind hier Energiekennzahlen bei kaltvermieteten Gebäuden und geleasteten Anlagen geeignet.

Viele Energieverbraucher sehen nicht das „Zeitfenster“, das heißt den beschränkten, aber entscheidenden Zeitpunkt einer Reinvestition, deren spezifischer Energieverbrauch für die übliche Nutzungsdauer dann fixiert bleibt und der auch bei Energiepreissteigerungen für die Dauer der üblichen Nutzung in den meisten Fällen nicht oder kaum gesenkt werden kann (zum Beispiel bei einer Gebäudefassadensanierung: 12 cm Wärmedämmung statt nur neuer Farbe).

Wenngleich die hier aufgeführten sektorübergreifenden Hemmnisse meist nur durch zielgruppenorientierte Maßnahmen abgebaut werden können, so sind doch viele Maßnahmen so ähnlich, daß ihre gebündelte Durchführung – beispielsweise durch eine Energie-Agentur – aus Effizienzgesichtspunkten sehr vorteilhaft sein kann.

## 2.6.2 Sektorspezifische Hemmnisse und Maßnahmen

Die sektorspezifischen Hemmnisse haben jeweils spezielle Ausprägungen der soeben aufgeführten sektorübergreifenden Hemmnisse. Sie einzeln aufzuzählen und zu erläutern, würde den Rahmen dieses zusammenfassenden Berichtes sprengen. Statt dessen sei auf das Studienpaket A.1.8 verwiesen (vgl. 6. Kapitel). Dennoch seien hier einige Einzelaspekte hervorgehoben:

- Eine Intensivierung der Vorort-Beratung von Bauherren und Hauseignern sowie der Fortbildung der Architekten und Baugewerke könnten die gravierenden Kenntnismängel im Raumwärmebereich privater Haushalte vermindern. Maßnahmen zur Markttransparenz beim Mietwohnungsbau erscheinen besonders von Bedeutung (Wärmepaß, Warmendmieten).
- Der Schlüssel zur rationellen Energienutzung bei den elektrischen Haushaltsgeräten liegt bei den

Herstellern und Händlern, das heißt bei freiwilligen Selbstverpflichtungen, Jahresstromkostenangaben beim Verkauf der Geräte, verbesserte Gebrauchsanweisungen und verbesserter Ausbildungsstand des Verkaufspersonals.

- Im privaten Straßenverkehr wird ein Bündel von Maßnahmen diskutiert (realistische Testverfahren für Kraftstoffverbrauchsangaben, freiwillige Selbstverpflichtungen der Hersteller, Umgestaltung der Kfz-Steuer, Entfernungs- statt Kilometerpauschale, Vorrechte von Fahrgemeinschaften im Ortsverkehr, Verknappung von Parkraum in Citylagen, verbesserte Kfz-Fahrausbildung).
- Finanzielle Anreize und preispolitische Maßnahmen (zum Beispiel generelle Parkplatzsteuer, Trennungsrechnung für die Deutsche Bundesbahn, volle Umlegung der Flugsicherungskosten, Mineralölsteuer auf Flugtreibstoffe), institutionelle Veränderungen und flexiblerer Fahrzeugeinsatz werden auch zur Förderung des öffentlichen Personenverkehrs empfohlen.
- Aufhebung der Regulierungen für den Werkverkehr, preispolitische Maßnahmen (zum Beispiel Referenz- statt Margentarife im Straßengüterverkehr, Leerfrachten-Börse), investitionspolitische sowie organisatorische Maßnahmen werden für den Straßen- und Schienengüterverkehr genannt.
- Kompetenzzersplitterung und Hierarchisierung sind wichtige Hemmnisse sowohl bei großen Unternehmen wie auch großen Gebietskörperschaften. Kontroll-Einsatz und Sensibilisierung des Führungspersonals sind hier wichtige Maßnahmen.
- Finanzierungsprobleme bei Unternehmen werden häufig überschätzt, während mangelnde Kenntnisse und nicht rationales Investitionsverhalten insbesondere bei kleinen und mittleren Unternehmen stark unterschätzt werden. Deshalb sind verstärkte Motivation durch Kammern und Fachverbände, mehr Fortbildung und die Förderung von Contracting-Unternehmen von besonderer Bedeutung.
- Viele Hemmnisse gegenüber der Kraft-Wärme-Kopplung (zum Beispiel Preisgestaltung für Strombezug, Netzeinspeisung und Reserve; spezielle Strompreisangebote für Betriebe und Kommunen, die eine Eigenerzeugung planen, mangelnde Kenntnisse potentieller Anlagenbetreiber, Finanzierungsengepässe kleiner und mittlerer Unternehmen sowie von Kommunen) könnten durch ein verändertes Selbstverständnis von Elektrizitätsversorgungsunternehmen (EltVU) aufgelöst werden, indem die EltVU selbst oder mit anderen Unternehmen gemeinsam rentable Investitionsmöglichkeiten in KWK-Anlagen nutzen. Weiterhin würden die Überlegungen des least-cost-planning zu neuen Tätigkeitsfeldern von Energieversorgungsunternehmen führen. Allerdings bestehen auch einige gravierende rechtliche Hemmnisse, die zugunsten der inländischen Kohle bestehen (zum Beispiel Verbot des Gas- und Öleinsatzes in Stromerzeugungsanlagen über 10 MW gemäß §12 des dritten Verstromungsgesetzes).

- Durch eine Exergie-Abgabe bei Endenergieträgern wäre es möglich, in der Preisbildung für Energieträger auch deren Arbeitsfähigkeit zu berücksichtigen. Durch diese Integration der „thermodynamischen Qualität“ in den Energiepreisen könnten einige Hemmnisse beim Ausbau der Fernwärmeversorgung beziehungsweise Kraft-Wärme-Kopplung vermindert werden.

Gemessen an der Anzahl energiepolitischer Maßnahmen auf der Energieangebotsseite mag die Fülle der hier angeführten Maßnahmen erschrecken. Hierzu läßt sich aber einschränkend feststellen:

- Manche der aufgeführten Maßnahmen sind als Alternativen zu verstehen.
- Einige Maßnahmen würden andere Maßnahmen höchst wirksam bündeln (zum Beispiel ein verändertes Selbstverständnis der Energieversorgungsunternehmen als Energiedienstleistungsunternehmen oder die Entstehung von Contracting-Unternehmen).
- Die Akteure für die vorgeschlagenen Maßnahmen wären in vielen Fällen nicht die zuständigen Ministerien von Bund und Land, sondern die Kammern, Fachverbände, der Städte- und Gemeindetag, neue Unternehmen sowie, nicht zuletzt, die Energieversorgungs-Unternehmen selbst.

## 2.7 Die Perspektiven der rationellen Energieverwendung bis 2050

Die Schätzungen der technischen Potentiale rationeller Energieverwendung haben häufig nur einen Zeithorizont von 15 bis 20 Jahren. Mit Ausnahme weniger Einzeltechniken (wie zum Beispiel der Wärmedämmung oder der Wärmerückgewinnung) weiß man sehr wenig, welchen spezifischen Energiebedarf in 40 bis 60 Jahren Anlagen und Maschinen in Industrie und Gewerbe oder Fahrzeuge haben werden. Zu groß sind die technologischen Veränderungspotentiale, und zu kurz sind die Reinvestitionszyklen der meisten Produktionsanlagen, Maschinen und Straßenfahrzeuge – lediglich Gebäude, Kraftwerke, Schiffe oder Lokomotiven machen hier eine Ausnahme. Dieser meist kurze Zeithorizont der (bekannten) technischen Energieeinsparpotentiale führt zu Ungleichheit in der Wahrnehmung der energietechnischen und forschungspolitischen Handlungsmöglichkeiten auf der Energienachfrage- und -angebotsseite und damit zu einer bevorzugten Forschung, Entwicklung und Anwendung neuer Techniken im Energieumwandlungssektor (vgl. Abb. 8).

Allgemein ist davon auszugehen, daß sich die in Tabelle 2 genannten technischen Potentiale rationeller Energieverwendung in den nächsten 20 bis 30 Jahren realisieren lassen (Ausnahme: Gebäude wegen der langen Reinvestitionsperioden). In den warenproduzierenden Sektoren in Industrie und Kleinverbrauch sowie bei Fahrzeugen wird sich der spezifische Energiebedarf durch zahlreiche neue Möglichkeiten weiter vermindern lassen, deren konkrete technische Lö-

sung erst in den nächsten Jahrzehnten erarbeitet werden wird. Vom technologischen Standpunkt aus sind theoretische Potentiale rationeller Energienutzung von über 80 Prozent, bezogen auf den heutigen Primärenergieverbrauch in der Bundesrepublik Deutschland (ohne ehemalige DDR), denkbar. Diese Möglichkeiten lassen sich im wesentlichen anhand zweier Grundprinzipien begründen:

- Die Arbeitsfähigkeit einer Energieform (Exergie), wird heute bei energietechnischen Entscheidungen häufig nicht beachtet. Die bessere Ausnutzung der Arbeitsfähigkeit von Brennstoffen, Wärme und Strom, das heißt eine verstärkte Anwendung von Kraft-Wärme-Kopplung in ihren verschiedenen technischen Varianten von GuD-Kombikraftwerken, Wärmetauschern, Brüdenkompressoren, Wärmetransformatoren, Hochtemperatur-Wärmepumpen und Brennstoffzellen eröffnet ein erhebliches Energieeinsparpotential, zum Beispiel in der Industrie um theoretisch höchstens 50 Prozent.
- Das heutige Niveau des Nutzenergiebedarfs, der Bezugsgröße der üblichen Angaben zu Energieeffizienzverbesserungen, ist selbst Gegenstand des technischen Fortschritts. Der heutige spezifische Nutzenergiebedarf einer Anwendung ist keine Naturkonstante, sondern vielmehr vom heutigen technischen Stand, dem Energiepreinsniveau, den Entscheidungsgepflogenheiten und Konsumgewohnheiten abhängig. Qualität und Ausmaß der Wärmedämmung vermindern die benötigten Wärmemengen in Gebäuden, Kälteanlagen und Produktionsmaschinen. Katalysatoren, Enzyme, neue Werkstoffe und Regeltechniken ermöglichen Verfahrenssubstitutionen und -verbesserungen in energieintensiven Industriebranchen in ganz erheblichem Ausmaß. Die Roheisen- und Stahlerzeugung wird in den nächsten 20 Jahren durch Einführung der Kohlemetallurgie und des Dünnbandgießens revolutioniert werden. Die Metallbearbeitung wird in vielen Fällen mit elektrischen Verfahren mit erheblich geringerem Primärenergieaufwand möglich sein. Neue Werkstoffe (zum Beispiel Spezialkunststoffe, geschäumte NE-Metalle) ermöglichen geringere Gewichte bewegter Teile und von Fahrzeugen. Eine weitere Schließung von energieintensiven Stoffkreisläufen (Stahl, Aluminium, Kupfer und anderen NE-Metallen, Kunststoffen, Glas, Papier/Pappe) ist ebenso absehbar wie eine Resubstitution energieintensiver Werkstoffe durch Holz, pflanzliche Fasern und pflanzliche Chemierohstoffe.

Das theoretische Energieeinsparpotential, das in der Verminderung der spezifischen Nutzenergie durch Vermeidung von Wärme- und Kraftverlusten, durch Verfahrenssubstitution und durch Kreislaufschießung energieintensiver Materialströme liegt, ist bis heute nicht systematisch untersucht. Überschlägige Schätzungen des FhG/ISI für den Bereich der Raumwärme, der Kälteanwendung, der Grundstoffindustrie, des Straßenverkehrs, der Investitions- und Verbrauchsgüterindustrien führen zu einem theoretischen technischen Energieeinsparpotential von mindestens 60 Prozent bei Industrieländern mit vergleichbar hohem Raumwärmeanteil wie in der Bundesrepu-

blik Deutschland. Hierin eingeschlossen sind Überlegungen, daß der spezifische Verbrauch energieintensiver Materialien durch verbesserte Materialeigenschaften und konstruktive Veränderungen gesenkt werden könnte.

Schließlich könnten auch die Nutzungszeiten von Produkten aus energieintensiven Materialien durch besseren Korrosionsschutz oder größere Wartungsfreundlichkeit erhöht werden. Dies würde die Kreislaufgeschwindigkeit energieintensiver Materialien und die auf die Energiedienstleistung bezogene spezifische Nutzenergie vermindern.

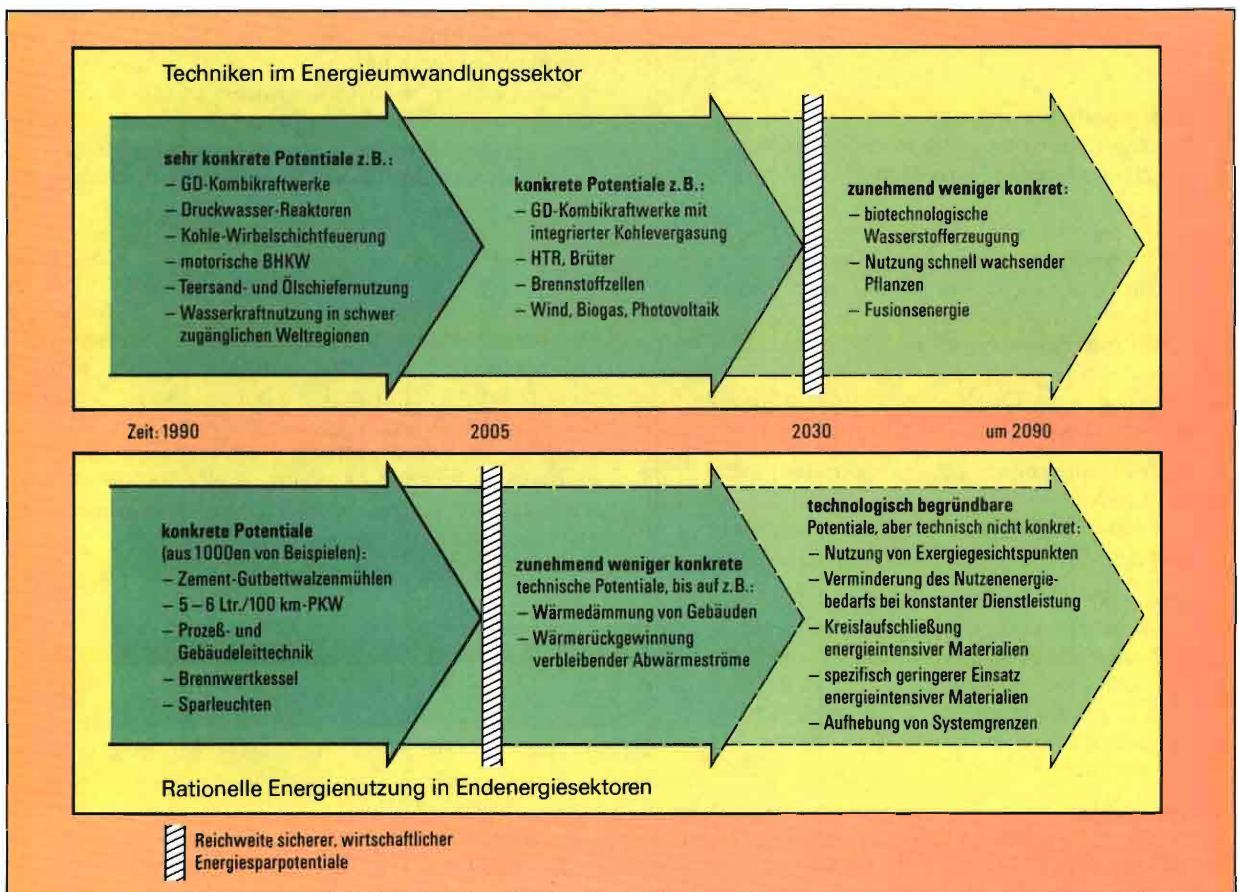


Abb. 8: Die ungleiche Wahrnehmung der Zeithorizonte technischer Potentiale zur rationellen Energienutzung und zur Energieumwandlung

Faßt man diese oben genannten Potentiale zusammen, so liegt das theoretische Potential rationeller Energienutzung bei mindestens 80 Prozent. Wieviel von diesem Potential innerhalb der nächsten 40 bis 60 Jahre realisiert werden könnte, hängt von Forschung und Entwicklung, den Energiepreiserwartungen der Hersteller von Investitionsgütern sowie von der Verkehrs-, Umwelt- und Energiepolitik ab.

Unterstellt man ein durchschnittliches Wirtschaftswachstum von 1,5 Prozent jährlich zwischen 2005 und 2050, das heißt eine Verdopplung des Produktions- und Konsumniveaus, so erscheint dennoch eine Verminderung des Energiebedarfs – unter Einschluß struktureller Einflüsse mit -0,5 Prozent/a – um vielleicht weitere 25 Prozent, bezogen auf 2005, als erreichbar. Allerdings würde eine derartige Effizienzsteigerung von durchschnittlich 1,5 Prozent/a eine bewußte Energieeinspar-, Forschungs- und Umweltschutzpolitik voraussetzen, um eine derartige Entwicklung über eine so lange Periode aufrecht erhalten zu können.

## 2.8 Energieeinsparung und Emissionsvermeidungspotentiale durch energiebewußtes Verhalten

Der Energiebedarf läßt sich außer durch die oben behandelten technischen Maßnahmen rationeller Energienutzung auch durch ein sensibilisiertes Energiebewußtsein um einige Procente mindern, nämlich dann, wenn die einzelnen Energieverbraucher ihre Anforderungen an Komfort und Energiedienstleistungen nach Menge und Qualität nur geringfügig zurückschrauben würden. Dazu gehören beispielsweise:

- Bei der Raumheizung das Senken der Raumtemperatur; eine Verminderung der Raumtemperatur um 1° C entspricht etwa einer Energieeinsparung um 6 Prozent.
- Bei der Raumkonditionierung von Wohn- und Arbeitsbereichen eine eingeschränkere Nutzung der heute üblichen „Vollraumheizung“; eine Teilbeheizung bei Abwesenheit und in Kälteperioden kann gegenüber einer Vollraumbeheizung zu einer Endenergiebedarfsminderung von bis zu 30 Prozent führen.
- Eine Änderung von Gewohnheiten und Ansprüchen, zum Beispiel im Hinblick auf die Mobilität im privaten Personen- und Luftverkehr oder auf überzogene und zum Teil die Gesundheit beeinträchtigende Anforderungen bei der Körperhygiene und der Wäschepflege (Warmwassereinsparung).
- Eine veränderte Einstellung zu Verbrauchsgütern und zu Verpackungssystemen, die zu aufwendig und wenig zweckgebunden sind.
- Wieder häufiger die Rückkehr der Trocknung von Wäsche an der freien Luft statt in Trocknern.
- Ein häufigeres Abschalten von leerlaufenden Maschinen, etwa dem PC, ungenutzten, aber beleuch-

teten Räumen, von Reklameleuchten und Verkehrsampeln in der Nacht, Halbleistungsschaltung von Straßenbeleuchtung nach Mitternacht etc.

- Bildung von Fahrgemeinschaften und Nutzung des Fahrrades im Nahbereich.

Wie die Beispiele zeigen, sind Verminderungen von Energiedienstleistungen und Konsum denkbar, die die Bevölkerung nicht zwingend als Wohlfahrtsverluste auffassen wird. Im Gegenteil: einige Verminderungen von Energiedienstleistungen wären sogar gesundheitsfördernd. Wie groß die Energieeinsparpotentiale durch energiebewußtes Verhalten und Komforteinbußen aufgrund freier Konsumentenentscheidung durch Aufklärung und moral suasion sein könnten, ist heute eine offene Frage. Allerdings zeigen die heutigen Verhaltenstrends, daß bei der gegenwärtig üblichen Lebensgestaltung mit zunehmender Freizeit und steigendem Einkommen für den Einzelnen häufig eine zunehmende Nachfrage nach Energiedienstleistungen verbunden ist (insbesondere Verkehrsleistungen im PKW und Flugzeug, Bäder/Saunanutzung). Eine sehr grobe Abschätzung der Wirkung energiebewußteren Verhaltens ohne einschneidenden Komfortverzicht kommt zu einer möglichen Energieeinsparung beim Endenergieverbrauch von etwa 4 Prozent bis 7 Prozent in den Bereichen private Haushalte, Verkehr, Kleinverbrauch und Industrie (vgl. Tab. 5). Dies entspräche in etwa einer ebenso großen Verminderung der CO<sub>2</sub>-Emissionen.

Dies zu erreichen, setzt die Einsicht vieler Energieverbraucher voraus, die sicher in dem genannten Umfang nicht ohne Mühe zu wecken ist. Eine Entwicklung zu energiebewußtem Verhalten wäre bei entsprechender Motivation, Erziehung und Werbung möglich, nicht zuletzt auch durch ein beispielhaftes Verhalten von gesellschaftlich exponierten Personen. Die Werbung für die Verminderung der Nachfrage nach Energiedienstleistungen hätte eine Reihe von guten Argumenten neben den umwelt- und klimabezogenen Vorteilen, wie zum Beispiel

- gesundheitliche Vorteile bei nicht überheizten Räumen
- Sicherheitsvorteile bei Verzicht auf motorisierte Verkehrsleistungen,
- mehr soziale Kontakte in der Nachbarschaft und am Ort infolge veränderter Freizeitmobilität sowie
- Imagebildung eines umweltbewußten Unternehmens oder einer Gebietskörperschaft.

Dauerhafte Verhaltensveränderungen entstehen nur bei Einstellungswandel. Aus individualpsychologischer Sicht wäre im Sinne einer Rückkopplung durch Selbstwahrnehmung anzustreben, erst kleine und dann zunehmend größere Verhaltensänderungen zu bewirken, weil Verhaltensänderungen allmählich auch zu Einstellungswandel führen können. Verhaltensangebote, Anreize und Visualisierung der Verhaltenskonsequenzen könnten Verhaltensänderungen unterstützen (vgl. Studienkomplex F.4 der Untersuchungen der Enquete-Kommission).



Tabelle 5

**Ausgewählte Beispiele energiebewußten Verhaltens und verminderter Nachfrage nach Energiedienstleistungen, Werte für 2005 in Petajoule (PJ)**

Beispiele für energiebewußtes Verhalten	betroffener Energieverbrauch <sup>1)</sup> in PJ	verminderte Endenergie-nachfrage in PJ
1. 1 bis 2 °C Temperaturabsenkung im Wohnbereich und Nichtwohnbereich (6 % je °C) .....	1 500	90 bis 180
2. Reduktion beheizter Wohnfläche bei Abwesenheit und Kälteperioden (10 % der Haushalte mit 20 % Einsparung) .....	1 000	20 bis 40
3. Verminderung des Warmwasserbedarfs um 10 bis 20 %; Freiluftwäschetrocknen anstelle des Trockners in 5 bis 10 % der Fälle ....	150	15 bis 30
4. Reduktion des privaten Straßen- und Flugverkehrs (10 bis 15 % von 690 Mrd. Pers.km) ....	1 100	110 bis 165
5. Abschalten bei Maschinenstillstand, von Reklame, Ampeln, Straßenbeleuchtung bei Nacht, Verpackungsabbau (1 bis 3 %) u. ä. ...	2 500	25 bis 75
6. ... ... ...		
Summe der ausgewählten Beispiele .....	6 790	260 bis 490 <sup>2)</sup> (4%) bis (7%)

<sup>1)</sup> Verbräuche der Energiepolitik-Variante 2005.

<sup>2)</sup> Die Enquete-Kommission sieht über die hier aufgeführten Beispiele hinaus weitere Möglichkeiten energiebewußten Verhaltens. Die Gesamtsumme der hierdurch erreichbaren Energieeinsparungen wird auf 5 bis 15 % geschätzt, wobei jedoch detaillierte Studien nicht für alle Bereiche vorliegen. Für ihre weitere Arbeit geht die Enquete-Kommission von einer addierbaren Emissionsreduktion von 5 Prozentpunkten gegenüber 1987 durch energiebewußtes Verhalten aus.

### 3. Emissionsminderung durch erneuerbare Energiequellen<sup>1)</sup>

(Studienkomplex A 2)

#### 3.1 Untersuchungsgegenstand

Von erneuerbaren Energiequellen, die heute in der Bundesrepublik Deutschland (ohne ehemalige DDR) erst mit 2,5 Prozent am Primärenergieverbrauch beteiligt sind, wird in Zukunft ein wesentlicher Beitrag zur Reduktion energiebedingter klimarelevanter Spurengase erwartet, da sie in ihrem Betrieb völlig emissionsfrei sind (Photovoltaik, Solarkollektoren, Wind, Wasser) oder im Vergleich zu konventionellen Systemen spezifisch geringere Emissionen aufweisen (zum Beispiel bei der Nutzung von Umgebungsenergie durch Wärmepumpen). Einer besonderen Bewertung unterliegt unter Emissionsgesichtspunkten die Biomasse: Zwar entstehen bei ihrer Verwendung als Energieträger CO<sub>2</sub>-Emissionen, doch wurden diese Mengen vorher beim Wachstum der Pflanzen der Atmosphäre entzogen – und auch bei der Zersetzung in der Natur würden sie in gleichem Umfang freigesetzt. In dem Maße, in dem Biomasse fossile Energieträger ersetzt, kommt es zu einer CO<sub>2</sub>-Entlastung. Dieser Kreislauf gilt zumindest solange, wie durch die energetische Nutzung der Biomasse deren Bestand nicht reduziert wird.

Innerhalb des Studienschwerpunktes „Erneuerbare Energiequellen“ wurden nur jene Nutzungssysteme untersucht, die bereits eine gewisse Anwendungsnähe erlangt haben. Verfahren und Techniken im Status der Grundlagenforschung – zum Beispiel direkte H<sub>2</sub>-Erzeugung durch Sonnenlicht –, die möglicherweise langfristig attraktive Optionen darstellen, wurden nicht einbezogen. Im einzelnen wurden behandelt:

- Photovoltaik,
- Windenergie,
- Wasserkraft,
- Biomasse,
- Solarkollektoren und solare Nahwärmesysteme,
- Wärmepumpen.

Neben diesen – ausschließlich unter dem Aspekt ihres direkten Einsatzes im Inland diskutierten – erneuerbaren Energiequellen wurden auch die Möglichkeiten von Energieimporten auf der Basis „nachwachsender Rohstoffe“ sowie „solarer Großanlagen“ betrachtet. Im vorliegenden Bericht wird auf folgende Aspekte eingegangen:

- Stand der Technik und Perspektiven,
- derzeitige Kosten und mögliche Entwicklungen,
- technische und wirtschaftliche Potentiale zur Reduzierung der Emissionen klimarelevanter Spurengase,

<sup>1)</sup> Dieser Teil wurde im Rahmen der zusammenfassenden Energiestudie (vgl. 6. Kapitel) von Dr. Ziesing federführend bearbeitet.

- Hemmnisse sowie Erwartungspotentiale bis 2005,
- Maßnahmen zur verstärkten Nutzung erneuerbarer Energiequellen.

Bei der Interpretation der im weiteren skizzierten Ergebnisse, die sich weitgehend auf die vorliegenden Einzelstudien sowie auf den dazu von den Koordinatoren erstellten zusammenfassenden Bericht stützen, ist zu beachten, daß von den Studienteilnehmern teilweise unterschiedliche energiepolitische Rahmenbedingungen unterstellt worden sind. Dies hat insbesondere Konsequenzen für die Schätzung künftiger Kosten und Potentiale. Hierauf wird im folgenden soweit wie möglich aufmerksam gemacht.

## 3.2 Stand der Technik und Kosten

### 3.2.1 Photovoltaik

Aus der Strahlungsenergie der Sonne kann durch photovoltaische (PV) Systeme elektrischer Strom gewonnen werden. Dabei nutzt man die Tatsache aus, daß bestimmte Halbleiterstrukturen bei der Bestrahlung mit Licht eine elektrische Spannung beziehungsweise einen Strom erzeugen. Bei der Umwandlung von Sonnenlicht in Elektrizität hängt der Umfang der erzeugten Energie von der eingestrahlt Menge der Sonnenenergie ab, das heißt vom Ort, von der Tages- und Jahreszeit sowie von den Wetterbedingungen. Die Gesamteinstrahlung setzt sich zusammen aus der direkten und der diffusen Strahlung. Beide können von PV-Systemen – im Unterschied zu thermischen Kollektoren – genutzt werden.

Grundelement eines PV-Systems ist das Modul als die elektrische Energie erzeugende Bauteil. Im Modul ist eine Reihe von Solarzellen so miteinander elektrisch verschaltet, daß sie einen Generator in einem nutzbaren Spannungs- und Strombereich ergeben. Damit erhält man typische Modulgrößen zwischen  $\frac{1}{3}$  und  $1 \text{ m}^2$ . Sie haben Spitzenleistungen bei voller Sonneneinstrahlung ( $W_p = \text{peak Watt}$ ) von 30 bis 120 Wp. Die anderen Systemkomponenten von PV-Systemen sind im wesentlichen konventioneller Natur (Konstruktionselemente zur Aufstellung der Module, elektrische Komponenten, Regler, Wechselrichter u. ä.).

Ein wesentliches Problem für PV-Systeme stellt die schwankende Solarstrahlung mit ihrer tages- und jahreszeitlich unterschiedlichen Verfügbarkeit dar. In unseren Breiten scheint die Sonne im Jahresdurchschnitt an etwa 1 300 bis 1 900 Stunden (etwa 15-20 Prozent des Jahres), wovon rund drei Viertel auf das Sommerhalbjahr entfallen. Sofern bei netzgekoppelten Systemen nicht schon ein Ausgleich über das Netz geschaffen werden kann, sind zur vollen Nutzung des Solarangebots Energiespeicher notwendig. In Frage kommen auch – meist im Inselbetrieb, das heißt ohne Netzanschluß – Hybrid-Systeme, bei denen dem Solargenerator ein anderer Generator – zum Beispiel mit Dieselantrieb – parallel geschaltet wird, der in einstrahlungsarmen Zeiten die Energieversorgung übernimmt.

Gegenwärtig werden im Bereich der Leistungsmodule fast ausschließlich Solarzellen aus mono- oder

multikristallinem Silicium eingesetzt. Sie zeichnen sich aus durch hohe Wirkungsgrade, große Robustheit und ausgereifte technologische Grundverfahren. Von deutschen Herstellern werden derzeit mit kristallinem Material in der Serie Module mit Wirkungsgraden im Bereich von 12 Prozent bis 14 Prozent gefertigt – je nachdem, ob multikristallines oder monokristallines Silicium-Material eingesetzt wird. Die Qualität des Materials konnte in den vergangenen Jahren stetig verbessert werden. Es wird erwartet, daß in der ersten Hälfte der neunziger Jahre die Zellenwirkungsgrade bei multikristallinen Zellen auf 14 bis 15 Prozent und bei monokristallinen Zellen auf 18 Prozent verbessert werden; bis Ende der neunziger Jahren werden Wirkungsgrade von 18 Prozent beziehungsweise 20 Prozent als erreichbar angesehen.

Durch das Fehlen einer Massenproduktion ließen sich die Produktionskosten in der Vergangenheit noch nicht in dem möglichen und erwünschten Umfang reduzieren. Erst bei größeren Produktionsmengen dürften auch die in Entwicklung befindlichen neuen Herstellverfahren wirtschaftlich werden, zum Beispiel die Bandziehverfahren zum Herstellen von Siliciumfolien aus der Schmelze, die dann die jetzt üblichen Sägeverfahren ablösen könnten.

Als Alternative zu der mit 0,2 mm relativ dicken kristallinen Siliciumzelle werden zahlreiche Dünnschicht-Technologien untersucht. Dabei hat das amorphe Silicium (a-Si) schon einen recht hohen Marktanteil erreicht; er konzentriert sich allerdings lediglich auf den Bereich der Stromversorgung von Kleingeräten in Innenräumen. Es wird bezweifelt, daß sich dieses Material für Leistungsanwendungen im Außenbereich eignet. In der Produktion konnten bisher weder ausreichende Wirkungsgrade erreicht, noch das Problem des bei Sonneneinstrahlung stark nachlassenden Wirkungsgrades (Degradation) gelöst werden. Bei einem erreichten Standard für gute bis sehr gute Module mit 8 Prozent Wirkungsgrad als Ausgangswert ist in den ersten zwei Monaten mit einem Leistungsabfall auf etwa 6 Prozent zu rechnen.

Vor diesem Hintergrund werden erhebliche Anstrengungen zur Verbesserung und Entwicklung von Dünnschichttechnologien unternommen. Dabei werden große Hoffnungen auf die im Labor erprobten Dünnschichtzellen der II/VI-Verbindungen gelegt, von denen gegenwärtig das Kupfer-Indium-Diselenid (CIS) besonders favorisiert wird. Dieser Zelltyp vereinigt geringen Materialverbrauch mit guten physikalischen und energetischen Eigenschaften. Die bisherigen Ergebnisse sind zwar erfolgversprechend, doch hat bisher kein Unternehmen die Produktion aufgenommen. Andere Entwicklungen – etwa auf Basis von Galliumarsenid oder Mehrfachzellen – befinden sich noch im Laborstadium. In der Bundesrepublik Deutschland werden die genannten Entwicklungslinien zwar intensiv verfolgt, doch ist ein technischer Rückstand insbesondere gegenüber Japan zu beobachten.

Weltweit betragen die Umsätze an PV-Modulen im Jahre 1988 rund 30 MW; fünf Jahre zuvor hatten sie erst bei 14 MW gelegen. Alle Anzeichen sprechen dafür, daß sich dieser Trend hoher Zuwachsraten fortsetzt. Schon heute sind teilweise regionale Angebots-

engpässe zu beobachten, obwohl die weltweite Produktionskapazität mit schätzungsweise 60 MW im Durchschnitt noch keineswegs ausgelastet ist. Vier Anwendungskategorien kennzeichnen derzeit den PV-Markt:

- netzferne kommerzielle Nutzung (Kommunikation, Signaltechnik, kathodischer Korrosionsschutz u. a.),
- netzfernes Wohnen (Beleuchtung, Wasserpumpen, Wasseraufbereitung, Kühleinrichtungen, Kommunikation u. a.),
- netzgekoppelte Anlagen (private und industrielle Gebäude, Kraftwerke),
- Kleingeräte (Rechner, Uhren, Batterieladegeräte u. a.).

Etwa die Hälfte des heutigen weltweiten Umsatzes entfällt auf die Kategorie „netzfernes Wohnen“ (in alleinstehenden Häusern und Hütten, in Campingwagen und Pkw), ein Viertel auf die netzferne kommerzielle Nutzung. Dagegen sind netzgekoppelte Anlagen mit einem Marktanteil von rund 5 Prozent bisher fast ausschließlich als Pilot- und Demonstrationsanlagen gebaut worden. Der Kleingeräte-Bereich, der als erster der Photovoltaik einen profitablen Markt geschaffen hatte, hält einen Marktanteil von bis zu 20 Prozent. In der Bundesrepublik Deutschland (ohne ehemalige DDR), wo die Produktionskapazitäten gegenwärtig vielleicht 6 MW und die Produktion 1 bis 2 MW betragen, waren Ende 1988 nach Informationen der VDEW 25 PV-Anlagen mit einer Leistung von insgesamt 0,7 MW in Betrieb sowie 17 Anlagen mit einer Leistung von knapp 1,4 MW in Bau oder in Planung (zum Vergleich: Die gesamte Leistung aller Wärmekraftwerke in der Bundesrepublik Deutschland ohne ehemalige DDR beträgt gegenwärtig rund 95 000 MW).

Wenn auch auf einem mengenmäßig niedrigen und in energiewirtschaftlichen Maßstäben zu vernachlässigenden Niveau ist die PV-Technik bereits vielfach erprobt. Allerdings ist bisher nur ein Teil der technischen Alternativen photovoltaischer Halbleitermaterialien, Zellaufbauten, Systemkonfigurationen und Fertigungsverfahren bekannt und detailliert untersucht. Viele offene Möglichkeiten in bezug auf Halbleitermaterial, Rohstoffherstellung, Modulfabrikation, Massenproduktion und Netzeinbindung lassen drastische Kostenreduktionen erwarten. Alles in allem stellt die Photovoltaik langfristig die wohl interessanteste Option der Nutzung erneuerbarer Energien dar.

Gemeinsames Ziel der notwendigen Fortentwicklung ist die Erhöhung der Wirkungsgrade, die Gewährleistung hoher Lebensdauern sowie die Kostenreduktion durch Materialeinsparung und billigere Herstellungsverfahren. In der Vergangenheit sind dabei schon erhebliche Erfolge erzielt worden, so daß die Modulpreise inzwischen auf 15 DM/Wp gesenkt werden konnten und die gesamten Systemkosten etwa 20 bis 25 DM/Wp betragen. Damit sind in der Bundesrepublik Deutschland ohne ehemalige DDR Stromgestehungskosten von etwa 1,65 bis 2,20 DM/kWh zu erreichen. In Ausnahmefällen sind auch heute schon niedrigere Kosten möglich. Eine weitere Reduktion wird zwar schon allein aufgrund des andauernden technischen

Fortschritts erwartet, doch hängen entscheidende Durchbrüche bei den heute bekannten PV-Systemen wesentlich davon ab, daß ein Übergang auf eine Großserienfertigung gelingt.

In den beiden zum PV-Bereich erarbeiteten Studien wird ein solcher Übergang unterstellt. Unter der — äußerst optimistischen und ohne beträchtliche energiepolitische Unterstützung von vornherein unrealistischen — Annahme des Aufbaus von Produktionskapazitäten in einer Größenordnung von 1 bis 3 GW/a wird bis 2005 mit einer Reduktion der spezifischen Systemkosten auf 3,8 bis 5 DM/Wp gerechnet, die in den Folgejahren bei nochmaliger Kapazitätsausweitung auf 5 bis 10 GW/a bis auf 3 bis 3,5 DM/Wp zurückgehen könnten. Unter diesen Voraussetzungen könnten die Stromgestehungskosten selbst unter hiesigen Klimabedingungen bis zum Jahre 2005 auf etwa 0,23 bis 0,30 DM/kWh fallen und später bei weiteren Fortschritten auf unter 0,2 DM/kWh sinken.

Diese Ergebnisse sind nicht als ein quasi autonom erwarteter Kostentrend zu interpretieren, sondern als eine an eng definierte Bedingungen gebundene Option einer prinzipiell denkbaren Entwicklung. Entscheidend ist ihre Abhängigkeit von dem unterstellten Aufbau großer Produktionskapazitäten, der ohne entsprechende energiepolitische Aktivitäten unvorstellbar ist. Denn abgesehen davon, daß die Errichtung von Produktionskapazitäten in Höhe von 1000 bis 3000 MW/a schon bis zum Jahre 2005 — also in nur 15 Jahren (bei heutiger Kapazität von etwa 6 MW) — zwar theoretisch möglich sein mag, so bleibt doch die Tatsache bestehen, daß bei den genannten Stromgestehungskosten noch kein konkurrenzfähiges Produkt entsteht. Dies ist erst bei einer weiteren Kostenreduktion der PV-Systeme und/oder bei weiteren Kostensteigerungen der konventionellen Stromerzeugung (zum Beispiel auch durch Internalisierung externer Kosten) denkbar. Vor diesem Hintergrund wird ein privatwirtschaftliches Unternehmen nur dann in Fertigungskapazitäten derartiger Größenordnung investieren, wenn gleichzeitig gesicherte Absatzmöglichkeiten bestehen. Um die langfristig großen Chancen für die PV-Technologie zu erhalten, muß die Energiepolitik — auch durch finanzielle Förderung — dazu beitragen, daß die Voraussetzungen für den Aufbau großer Fertigungskapazitäten geschaffen werden können.

### 3.2.2 Windenergie

Windkraftanlagen werden bereits in großer Zahl genutzt. Dabei handelt es sich überwiegend um kleinere Anlagen mit Rotordurchmessern zwischen 10 m und 35 m. Hiervon dürfte es derzeit weltweit etwa 15 000 — 20 000 Windenergiekonverter (WEK) geben. Daneben existieren nur etwa 50 Anlagen mit mehr als 35 m und 15 Anlagen mit über 60 m Rotordurchmesser. In der Bundesrepublik Deutschland (ohne ehemalige DDR) waren Ende 1988 etwa 260 WEK mit einer Leistung von 11,5 MW in Betrieb.

Gegenwärtig betätigen sich weltweit 200 bis 250 Firmen in der Produktion von Windenergieanlagen. In der Bundesrepublik Deutschland (ohne ehemalige DDR) sind es 21 Hersteller, die bisher ca. 700 WEK für

den In- und Auslandsmarkt produziert haben. Führend auf dem Gebiet der Herstellung von WEK sind dänische Unternehmen, die 1987 einen Weltmarktanteil von über 70 Prozent hielten.

In den vergangenen Jahren ist ein deutlicher Trend weg von den kleinen (10 bis 100 kW) hin zu mittelgroßen Anlagen (100 bis 400 kW) zu erkennen. Während kleine und mittelgroße WEK teilweise schon Serienstatus erreicht haben, besteht bei Großanlagen im MW-Bereich noch ein erheblicher Entwicklungsbedarf.

Die Entwicklung der Rotoren konzentriert sich auf Schnellläufer mit geringer Blattzahl. Der bisher häufigste Typ ist der Dreiblatt-Horizontalachsrotor mit starren Rotorblättern, der bei kleinen und mittleren Anlagen bevorzugt verwendet wird. Großanlagen werden meist mit zwei Blättern ausgerüstet. Der Einblattrotor als technisch anspruchsvollste Variante muß seine Eignung und Zuverlässigkeit noch nachweisen.

Die spezifischen Leistungen von WEK steigen außer mit der Windgeschwindigkeit auch mit dem Rotordurchmesser. Außerdem werden sie von der Rotorauslegung beeinflusst. Daher variieren auch die Jahresvollaststunden, die bei kleinen Anlagen unter 2 000 h/a, bei großen aber bei 3 000 h/a liegen können. Bei der Aufstellung einer größeren Zahl von Windenergiekonvertern sind Abstände von mindestens 8 bis 10 Rotordurchmessern zwischen den Anlagen notwendig. Aus dem Umstand daß der Energieertrag pro Flächeneinheit bei Großanlagen (100 m Durchmesser) etwa doppelt so hoch ist wie bei kleineren Anlagen (15 m Durchmesser), läßt sich der Schluß ziehen, daß bei grundsätzlich begrenzten Standorten und Flächen eine Nutzung der Windenergie in energiewirtschaftlich relevantem Maßstab den Einsatz größerer Anlagen erfordert als sie heute üblich sind.

Derzeit liegt aber das Kostenminimum noch bei mittelgroßen WEK im Bereich einiger 100 kW. Im Kostenminimum betragen die Stromgestehungskosten nach den Angaben der WISA-Energiesysteme GmbH gegenwärtig bei einer angenommenen mittleren Windgeschwindigkeit von 6 m/s für eine 556 kW-Anlage bei spezifischen Investitionskosten (einschließlich Infrastrukturkosten) von fast 2 000 DM/kW knapp 10 Pf/kWh. Dabei sind schon kostengünstige serienreife Anlagen unterstellt worden, so daß künftig mit keiner wesentlichen zusätzlichen Kostenreduktion gerechnet wird. Demgegenüber könnten bei großen Anlagen in Zukunft die Investitionskosten deutlich — und zwar um gut 30 Prozent — reduziert werden. Im Ergebnis würde dann eine 1 445 kW-Anlage knapp 1 800 DM/kW kosten und den Strom zu rund 8 Pf/kWh produzieren. Die Ludwig-Bölkow-Systemtechnik (LBS), die langfristig vom Einsatz von 5 MW-WEK mit spezifischen Investitionskosten von 2 600 DM/kW ausgeht, kommt zu Stromerzeugungskosten von 7 bis 8 Pf/kWh.

Bei einer Bewertung dieser Ergebnisse ist zu beachten, daß zum Beispiel die Grundstückskosten generell unberücksichtigt bleiben und große WEK im MW-Bereich erst noch zur Serienreife entwickelt werden müssen, bevor sie praktisch eingesetzt werden können. Vor diesem Hintergrund erscheinen die genann-

ten Stromerzeugungskosten für kleine und mittlere WEK auch wesentlich belastbarer als jene für große Anlagen, die einen vergleichbaren Status erst langfristig erreichen dürften.

Eine kontrovers geführte Diskussion betrifft die Anrechenbarkeit eines Anteils der Windkraftwerkskapazitäten als "gesicherte Leistung", und die maximale Penetration der Windenergie in einem Verbundnetz. Nicht zuletzt von einer Antwort auf diese Frage, die auch im Rahmen des Studienprogramms nicht abschließend zu klären war, hängt die wirtschaftliche Bewertung der Windenergie ab.

Insgesamt sind die kleinen und mittelgroßen Systeme zur Nutzung der Windenergie, wie die zahllosen Anwendungsbeispiele zeigen, inzwischen technisch weitgehend ausgereift und nicht weit entfernt von der Wirtschaftlichkeitsschwelle. Hier kommt es in Zukunft vor allem auf Detailoptimierungen und größere Fertigungsstückzahlen an. Der wegen der Landnutzungsprobleme notwendige Übergang auf WEK im MW-Bereich erfordert dagegen noch in erheblichem Umfang intensive Entwicklungsarbeiten, deren Ziel insbesondere die deutliche Kostenreduktion sein muß.

### 3.2.3 Wasserkraft

Wasserkraftwerke sind Stand der Technik. Die Wasserkraft ist in der Bundesrepublik Deutschland (ohne ehemalige DDR) die gegenwärtig am meisten genutzte erneuerbare Energiequelle. Insgesamt hat die Stromerzeugung aus natürlichen Zuflüssen im Jahre 1987 fast 20 TWh betragen. Das jährliche Regelarbeitsvermögen kann auf knapp 18 TWh veranschlagt werden.

Die Möglichkeiten eines zusätzlichen Stromversorgungsbeitrages durch neue Wasserkraftquellen (zum Beispiel Nutzung der Gezeiten- und Wellenenergie, der Meeresströmung und Meereswärme sowie der Salzgehaltsgradienten) sind zumindest für die Bundesrepublik Deutschland als weniger relevant anzusehen. Deshalb beschränkt sich die weitere Betrachtung auf die ausgereifte konventionelle Nutzung der Wasserkraft. Technische Perspektiven beziehen sich hier vor allem auf die Entwicklung elektronischer Steuerungs- und Regeleinrichtungen, auf den Einsatz von vollautomatischen Betrieben und auf die Serienfertigung standardisierter Turbinentypen insbesondere für Kleinwasserkraftanlagen.

Die zusätzliche Stromerzeugung aus Wasserkraft kann durch Revitalisierung von stillgelegten Anlagen, durch Ausbau und Modernisierung bestehender Anlagen sowie durch Neubau realisiert werden. Eine ins Gewicht fallende Steigerung setzt nach Ergebnissen der vorliegenden Studie aber vorrangig den Neubau von Wasserkraftwerken voraus. Allerdings liegen wirtschaftlich günstige Standorte, an denen große Fallhöhen genutzt werden können, meist in Gebieten, in denen der Bau von Wasserkraftwerken mit den Zielen des Naturschutzes in Konflikt steht.

Wasserkraftwerke sind zwar sehr kapitalintensiv, doch stehen dem ihre langen Nutzungsdauern sowie

ihre sehr geringen Betriebskosten positiv gegenüber. Bei neuen, größeren Wasserkraftwerken, deren spezifische Investitionskosten auf 5 000 bis 7 000 DM/kW veranschlagt werden, lassen sich Stromerzeugungskosten von etwa 7 bis 11 Pf/kWh erreichen. Bei Modernisierungsmaßnahmen sind noch wesentlich niedrigere Werte zu erzielen. Damit sind Wasserkraftwerke mit einer Leistung über 1 MW, zumal wenn sie in Regie der Elektrizitätsversorgungsunternehmen (EVU) stehen, überwiegend konkurrenzfähig. Wesentlich differenzierter stellt sich die Situation bei Kleinwasserkraftwerken (mit weniger als 1 MW) dar, die überdies meist unabhängig von den EVU betrieben werden. Deren Wirtschaftlichkeit hängt nicht nur von den Investitionskosten und der Anlagenausnutzungsdauer ab, sondern — abhängig vom Verwendungszweck des erzeugten Stroms — vom Strombezugspreis oder von der Vergütung für den ins Netz eingespeisten Strom. Die Vergütungen für Stromeinspeisungen ins öffentliche Netz, die derzeit bei mittlerer Auslastung und bei Anwendung des geltenden VDEW-Vergütungsmodells bei 8,4 bis 9,7 Pf/kWh liegen, bewegen sich am unteren Rand der Stromerzeugungskosten von Kraftwerken, die heute in der Bundesrepublik Deutschland (ohne ehemalige DDR) nach dem Stand der Technik und des Umweltschutzes gebaut werden. Für Stromeinspeisungen aus kleinen Wasserkraftanlagen erlauben sie oft keinen wirtschaftlichen Betrieb.

Häufig sind die Investitionskosten kleiner Wasserkraftanlagen prohibitiv hoch. Anlagen unter 100 kW, bei denen die spezifischen Investitionskosten in einer Größenordnung von 10 000 DM/kW liegen, amortisieren sich in der unterstellten Nutzungszeit von 40 Jahren nur unter günstigen Randbedingungen. Schon bei etwas größeren Anlagen (etwa 300 kW) kann unter bestimmten hydrologischen Voraussetzungen und spezifischen Investitionskosten von knapp 8 000 DM/kW immerhin mit Stromerzeugungskosten von 10 — 11 Pf/kWh gerechnet werden. Ungünstigere hydrologische Bedingungen wirken sich aber deutlich negativ auf das wirtschaftliche Resultat aus. Eine Wirtschaftlichkeit ist oft nur bei einem niedrigen Ausbaugrad gegeben. Dies aber reduziert das Arbeitsvermögen der einzelnen Anlage und damit die wirtschaftlichen Möglichkeiten der Ausschöpfung des technischen Potentials.

### 3.2.4 Biomasse

Nach der Wasserkraft steht die Biomasse (Holz, Stroh, Biogas, aber auch Müll und Produktionsrückstände) gegenwärtig an zweiter Stelle bei der Nutzung erneuerbarer Energiequellen in der Bundesrepublik Deutschland (ohne ehemalige DDR). Ausweislich der Energiebilanzen beträgt ihr Versorgungsbeitrag zusammen derzeit rund 100 PJ (3,5 Millionen Tonnen SKE) Primärenergie.

Bei der energetischen Nutzung von Biomasse handelt es sich um eine Vielzahl von Möglichkeiten, die entweder auf mechanische, thermo-chemische oder biologische Prozesse zurückgehen. Dabei kann Biomasse sowohl zur Wärmeerzeugung als auch zur reinen oder gekoppelten Erzeugung von Strom und Wärme in

KWK-Anlagen verwendet werden. Die Zahl der verfügbaren Umwandlungstechnologien und Einzeltechniken ist außerordentlich groß. In der zur Biomasse erstellten Studie wurden die folgenden Bereiche untersucht:

- Waldschwachholz, Abfallholz und Industrierestholz,
- Überschußstroh,
- Vergasung beziehungsweise Pyrolyse von Lignocellulose,
- Biogas aus Gülle,
- Rottewärmenutzung,
- Biogaserzeugung aus Grünabfällen,
- Deponiegasnutzung,
- anaerobe Müllbehandlung,
- Müllverbrennung,
- Klärgasnutzung,
- Biogaserzeugung aus Industrieabwässern.

Größere Erfahrungen im praktischen Einsatz liegen in der Bundesrepublik Deutschland (ohne ehemalige DDR) mit der Verbrennung von Holz und Stroh, mit der Biogaserzeugung aus Gülle, der Deponie- und Klärgasnutzung sowie mit der Müllverbrennung organischer Stoffe vor. In diesem Bereich gibt es schon zahlreiche Anlagen. Dagegen befinden sich die Äthanolherzeugung aus Stroh, die Rottewärmenutzung, die Biogasnutzung aus Grünabfällen sowie die anaerobe Müllbehandlung allenfalls im Demonstrationsstadium.

Biomasse wird bisher meist dort eingesetzt, wo sie auch unter Umweltgesichtspunkten verbrannt (zum Beispiel Müll, Deponiegas) oder als Produktionsabfall unter möglichst hohem Nutzen entsorgt werden muß (zum Beispiel Industrieabfall- und -restholz, Schwachholz, Biogas aus Gülle). Wirtschaftlich hat sich die Biomassenutzung in der Bundesrepublik Deutschland in breitem Umfang aber noch nicht durchsetzen können. Dies ist vor allem auch darin begründet, daß es aufgrund der niedrigen Preise für fossile Energieträger derzeit kaum einen ökonomischen Anreiz für entsprechende Substitutionsprozesse gibt. Dieser Anreiz wird zusätzlich noch dadurch gemindert, daß die Systeme zur Biomassenutzung oft wesentlich teurer sind als die konkurrierenden konventionellen Techniken. Dies gilt insbesondere dort, wo bisher Anlagen nur als Prototypen oder in Kleinserie produziert werden. Außerdem ist den meisten Nutzungsformen der Biomasse ein vergleichsweise hoher Handhabungsaufwand sowie eine stärkere Komplexität (zum Beispiel Veränderungen in der Zusammensetzung der Inhaltsstoffe der Biomasse) mit oftmals größerer Störanfälligkeit gemeinsam. Schließlich fehlt es mangels entsprechender Demonstrationsanlagen an ausreichender Erfahrung im Umgang mit diesen Techniken, wodurch häufig auch die Genehmigungsverfahren erschwert werden, und an einer umfassenden unabhängigen Beratung. Andererseits ist aber zu berücksichtigen, daß die Biomassenutzung häufig einen wünschenswerten Beitrag zur wirtschaftlichen und umweltschonenden Abfallbeseitigung leisten kann.

### 3.2.5 Nachwachsende Rohstoffe

Biomasse, nach land- und forstwirtschaftlichen Prinzipien erzeugt, ermöglicht einen – zwar nicht lokal, aber immerhin global – geschlossenen CO<sub>2</sub>-Kreislauf. Neben der Nahrungs- und Futtermittelbereitstellung kann das Produktionsziel entweder in der Erzeugung von Industrierohstoffen (zum Beispiel Öl, Zucker, Zellulose, Holz, Stärke) oder von Energieträgern (zum Beispiel Festbrennstoff, Öl, Alkohol) bestehen. Die Umformung von Festbrennstoffen zu Flüssigkraftstoffen ist zusätzlich möglich.

Die Rohstoff- und Energieträgerproduktion konkurriert neben der ökologischen Nutzungen in der Bundesrepublik Deutschland (ohne ehemalige DDR) und in der EG um vorhandene Überschußflächen. Nach vorliegenden Schätzungen stehen in der Bundesrepublik Deutschland (ohne ehemalige DDR) bis zum Jahre 2005 2 bis 4 Millionen ha (20000 bis 40000 km<sup>2</sup>) sog. Agrarüberschußflächen zur Verfügung. Bei der Nutzung dieser Flächen für die Energieträgerbereitstellung in Form von Festbrennstoffen (zum Beispiel Hackschnitzel) ließen sich darauf 2005 rund 420 PJ, also rund 10 Millionen Tonnen Öläquivalent (OE), und 2050 fast 1 300 PJ, also 30 Millionen Tonnen OE, erzeugen. Bei der alternativen Produktion von Rapsöl als Dieselerersatz errechnen sich rund 100 PJ (2005) sowie 190 bis 315 PJ (2050); bei der Erzeugung von Äthanol als Benzinersatz wären es etwa 60 bis 105 PJ (2005) und 130 bis 210 PJ (2050). Das Potential, das sich aus der Nutzung der genannten Agrarüberschußflächen ergibt, wäre demnach vergleichsweise gering.

Theoretisch könnten jedoch Energieträger aus Biomasse in einem Umfang importiert werden, der dem Verbrauch aller fossilen Rohstoffe (Energieträger eingeschlossen) in der Bundesrepublik Deutschland (ohne ehemalige DDR) entspricht. Denn weltweit ließen sich auf nicht oder nur extensiv genutzten Agrarflächen grundsätzlich so viele Energieträger produzieren, daß man damit sämtliche fossilen Energieträger (7 Milliarden Tonnen OE/a) ersetzen könnte. Diese Art der Energieträgerproduktion setzt ähnliche Techniken wie bei der zuvor behandelten Biomassenutzung voraus.

Bei der Erzeugung von Industrierohstoffen stellen Schmieröle und Hydrauliköle aus Raps eine mögliche Alternative dar: Die Produktions- und Aufbereitungstechniken sind weitgehend ausgereift und die deutlich geringere Umweltbelastung wird nur mit unwesentlich höheren Kosten gegenüber fossilen Brennstoffen erkaufte. Interessant sind auch die Zucker- und Stärkeherzeugung auf Biomassebasis sowie Zellulose und Holz, die aus Durchforstungsmaterial oder in größerem Umfang aus Schnellwuchsplantagen bereitgestellt werden können. Die Kurzzeitforstnutzung hat in der Bundesrepublik Deutschland (ohne ehemalige DDR) bislang allerdings nur Demonstrationscharakter (zur Zeit 50 ha). Gleiches gilt für den Einsatz von Einjahrespflanzen zur Energiegewinnung.

Neben der Nutzung als Industrierohstoff kann Holz energieeffizient als Brennstoff eingesetzt werden. Daneben gibt es Pflanzenöle aus Raps, Sonnenblumen

und Soja einerseits und Alkohol aus Zuckerrüben, Weizen, Mais, Kartoffeln und Zuckerhirse, eine neu entdeckte Option, andererseits. Aufgrund der begrenzten Flächenverfügbarkeit in der Bundesrepublik Deutschland könnten in Zukunft Pflanzenöle und Alkohol nur dann eine größere Rolle spielen, wenn sie importiert würden, da sie leichter und mit einem wesentlich höheren spezifischen Energiegehalt zu transportieren sind als Festbrennstoffe mit ihren hohen Wasseranteilen. Heimische Überschußflächen sind für Industrierohstoffe und Festbrennstoffe rentabler nutzbar. Allerdings ist zur Zeit noch ungeklärt, in welchem Maße Landflächen für die Erzeugung von Energieträgern tatsächlich zur Verfügung stehen, da sie mit der Nahrungsmittelproduktion konkurrieren und die Machbarkeit einer geregelten Forstwirtschaft in tropischen Gebieten umstritten ist.

Die Produktion von Festbrennstoffen in Schnellwuchsplantagen oder als Einjahrespflanzen verursacht in der Bundesrepublik Deutschland (ohne ehemalige DDR) Kosten von 0,4 bis 0,7 DM/l Öläquivalent beziehungsweise 11 bis 19,4 DM/GJ (vor Steuer). Die Kosten reduzieren sich auf 0,2 bis 0,3 DM/l OE, wenn man Vermarktungsbeihilfen in Höhe von 1 000 bis 2 000 DM/ha ansetzt, welche von der EG ohnehin ausgegeben werden, um zum Beispiel Überschußweizen zu „entsorgen“. Pflanzenöl als Treibstoff kostet je nach Nutzungsmöglichkeit der Nebenprodukte 1 bis 2 DM/l, (27 bis 54 DM/GJ), Alkohol je nach Ausgangssubstrat 1,5 bis 2,4 DM/l Benzinäquivalent (41,6 bis 66 DM/GJ), beides vor Steuern. Alle Kostenberechnungen leiden daran, daß sie stark standortabhängig sind und die Bewertung ihrer Nebenprodukte weitere Unsicherheiten bringt. Deshalb sind belastbare, verallgemeinerungsfähige Angaben kaum möglich.

Eine verstärkte Nutzung nachwachsender Rohstoffe hätte den Vorteil eines global geschlossenen CO<sub>2</sub>- und Mineralstoffkreislaufes (auch O<sub>2</sub>, S, P, Ca, K). Außerdem würde dadurch der Ausdehnung von Trockengebieten, die ebenso das Klima kritisch belastet, entgegengewirkt. Diese sehr optimistische Option der Biomassenutzung in Entwicklungsländern setzt allerdings voraus, daß Anbau, energetische Umwandlung, Transport und Speicherung der Biomasse und der daraus abgeleiteten Energieträger sozial verträglich, ökologisch unbedenklich und beschäftigungspolitisch sinnvoll sind. Erfahrungen mit Großversuchen in dieser Richtung – etwa das brasilianische Alkoholprogramm – erwecken daran eher Zweifel.

Unsicherheiten bestehen auch hinsichtlich der „energetischen Rückzahlzeit“ bei der Nutzung nachwachsender Rohstoffe. Nach Aussage der TU-München verhält sich der energetische Aufwand zum Energieertrag wie 1 : 10 bis 1 : 20, je nach Pflanzenart und Standort. Andere Quellen (Kleemann, Meliß 1988, vgl. Nr. 10) lassen die Vermutung zu, daß zumindest bei bestimmten Nutzungsketten in der Bundesrepublik Deutschland (ohne ehemalige DDR), zum Beispiel bei der Äthanolherzeugung aus Zuckerrüben, auch eine negative Nettoenergiebilanz nicht auszuschließen ist. Vor einem Einstieg in eine breite Nutzung nachwachsender Rohstoffe sollte daher eine belastbare Klärung der hier angesprochenen Fragen herbeigeführt werden.

### 3.2.6 Solare Großanlagen und Import solarer Energieträger

Unter solaren Großanlagen wird die großflächige Nutzung erneuerbarer Energiequellen im In- und Ausland verstanden. Über den Einsatz von Photovoltaik sowie Windenergie in der Bundesrepublik Deutschland hinaus ist dabei vor allem an die großtechnische Nutzung der Photovoltaik und Solarthermik zur Stromerzeugung einschließlich der eventuellen Umwandlung in Wasserstoff in den sonnenreichen Ländern des Mittelmeerraumes und an den anschließenden Transport von Strom und Wasserstoff in die Bundesrepublik zu denken. Die untersuchten Systeme bestehen aus photovoltaischen und solarthermischen Stromerzeugern in Spanien beziehungsweise Nordafrika, elektrischen Wandlerstationen sowie HGÜ-Leitungen (Hochspannungsgleichstromübertragung) bis in die Bundesrepublik Deutschland. In Systemen, die der Versorgung mit Wasserstoff dienen, werden solare Stromerzeuger mit Elektrolyseuren zur Herstellung von Wasserstoff, Unter-Tage-Speichern und einer Wasserstoffrohrleitung in die Bundesrepublik Deutschland gekoppelt. Um die Strom- wie die Wasserstoffbereitstellung von der solaren Stromproduktion zu entkoppeln, kommen auch Systeme mit Speichern (für Strom Batteriespeicher und für Wasserstoff Unter-Tage-Speicher) in Betracht. Der technologische Status der einzelnen Systemkomponenten (außer PV) kann wie folgt skizziert werden:

**Solarthermische Kraftwerke:** In Betrieb sind bereits Kraftwerke mit mehreren hundert MW Leistung auf der Basis von Parabolrinnen. Einige Solarturmkraftwerke sind erprobt, jedoch momentan nicht mit den Parabolrinnen konkurrenzfähig.

**Hochspannungs-Gleichstrom-Übertragung (HGÜ):** Technik in mehreren Überlandleitungen weltweit erprobt, wegen unterschiedlicher Spannungsniveaus von Freileitungen und Seekabeln müssen bei gemischten Übertragungswegen (zum Beispiel Nordafrika) entsprechende Umformer integriert werden. Langfristig könnte die Supraleitung diese konventionellen Systeme ablösen.

**Stromspeicherung:** Blei-Säure-Batterien sind Stand der Technik. Andere großtechnische Entwicklungslinien, wie die Natrium-Schwefel-Batterie u. a., sind gegenwärtig hinsichtlich ihrer wirtschaftlichen Vorteile nicht abschließend zu beurteilen. Langfristig könnte auch hier die Supraleitung neue Möglichkeiten eröffnen.

**Wasserstoffherzeugung:** Elektrolyseuren sind seit mehreren Jahrzehnten sowohl in Klein- als auch in Großanlagen in Betrieb. Strombedarf und Kosten müssen noch gesenkt und das Betriebsverhalten bei fluktuierendem Betrieb (infolge schwankender Sonneneinstrahlung) verbessert werden.

**Gasferntransport:** Es liegen langjährige Erfahrungen mit großen Erdgasverbundnetzen vor. Die Übertragbarkeit auf den Transport von Wasserstoff ist mit geringen Modifikationen gegeben, da auch bereits Erfahrungen mit Wasserstoffpipelines zwischen europäischen Standorten der Petrochemie bestehen.

Großspeicher für gasförmigen Wasserstoff (GH<sub>2</sub>): Erdgas-Untertage-Gasspeicher eignen sich auch für die Speicherung von Wasserstoff. Technik und Kosten sind übertragbar.

Flüssigwasserstoff (LH<sub>2</sub>): Großverflüssigungsanlagen und auch Großspeicher wurden in den Raumfahrtprogrammen erprobt. Innerhalb der Übertragungskette fehlt noch das Transportmittel LH<sub>2</sub>-Schiff. Voruntersuchungen hierzu sind angelaufen. LH<sub>2</sub> eignet sich besonders für den Einsatz im Verkehrsbereich (Flugzeuge und Kraftfahrzeuge mit hohen Fahrleistungen).

Brennstoffzellen, in denen Wasserstoff mit hohem Wirkungsgrad in Strom und Wärme umgewandelt werden kann, sind – abhängig von der jeweiligen Technologie – teilweise schon verfügbar, erfordern für ihren breiten Einsatz und die notwendige Kostenreduktion aber noch erheblichen Entwicklungsaufwand.

Obwohl bereits Erfahrungen mit den einzelnen Komponenten vorliegen, fehlen sie im Hinblick das Zusammenspiel und die Erprobung auf der Systemebene. Solare Großanlagen können prinzipiell große bis sehr große Energiebeiträge bereitstellen. Die Ermittlung technischer Obergrenzen – und damit eine Bestimmung von technischen Potentialen – ist daher nicht sinnvoll. Nutzungseinschränkungen resultieren aus wirtschaftlichen Gesichtspunkten und aus Einschränkungen technischer, ökologischer und struktureller Art.

Die ökonomisch günstigste Art der solaren Energieerzeugung in Großanlagen ist die unmittelbare Nutzung der Elektrizität. Die Gesteungskosten importierten Solarstroms werden für 2005 frei Grenze in der Bundesrepublik Deutschland mit 25 bis 28 Pf/kWh veranschlagt. In Verbindung mit einem Batteriespeicher erhöhen sich die Kosten auf 40 bis 56 Pf/kWh. Die Gesteungskosten für gasförmigen Wasserstoff frei Grenze werden für 2005 mit 31 bis 41 Pf/kWh und diejenigen für flüssigen Wasserstoff aus Strahlungsenergie mit 47 Pf/kWh beziehungsweise aus (kostengünstiger) Wasserkraft mit 19 Pf/kWh angegeben. Über 2005 hinaus wird eine weitere, deutliche Kostenreduktion erwartet. Zumindest mit Blick auf die Wasserstofflinie wird allerdings kaum vor 2025 mit einer konkurrenzfähigen Nutzung gerechnet.

### 3.2.7 Solarkollektoren und solare Nahwärmesysteme

Gegenwärtig sind in der Bundesrepublik Deutschland Solarkollektoranlagen mit einer geschätzten Kollektorfläche von insgesamt etwa 0,37 Millionen m<sup>2</sup> in Betrieb, die eine Endenergieeinsparung von 390 TJ/a bewirken. Die meisten derzeit betriebenen Systeme dienen der Brauchwassererwärmung und Schwimmbadbeheizung. Teilweise werden dabei größere Kollektorflächen und Speicher eingesetzt. Systeme zur Erzeugung von solarer Prozeßwärme um 100°C oder zur Vorerwärmung industriellen Warmwassers werden bisher kaum genutzt.

Großflächige Kollektorfelder für die Versorgung einer Vielzahl von Verbraucherguppen setzen eine zen-

trale Wärmeversorgung mit Nahwärmenetz voraus (solare Nahwärme). Solche Systeme sind in der Bundesrepublik Deutschland noch nicht installiert. Positive Erfahrungen liegen aber in Schweden vor, wo bereits sechs große solare Nahwärmesysteme mit Kollektorflächen von über 1 000 m<sup>2</sup> in Betrieb sind. Das bisher größte befindet sich in Lyckebo. Hier beheizen Solarkollektoren mit einer Fläche von 4 300 m<sup>2</sup> und einem unisolierten Felskavernenspeicher von 105 000 m<sup>3</sup> insgesamt 550 Einfamilienhäuser. In Planung befindet sich sogar eine Anlage mit einer Kollektorfläche von 120 000 m<sup>2</sup> und einem Kavernenspeicher von 400 000 m<sup>3</sup> in Kungälv.

Die Systemausbeuten sind abhängig von den Kollektorarten, der Systemkonfiguration und dem Bedarf des Nutzers. Für kleine, solarunterstützte Heizungssysteme mit Flachkollektoren ergibt sich ein spezifischer solarer Nutzenergiegewinn von lediglich 180 kWh/m<sup>2</sup> und Jahr. Bei großen Systemen zur Nahwärmeerzeugung und bei hocheffizienten Systemen zur Brauchwassererwärmung werden dagegen 550 kWh/m<sup>2</sup> und Jahr erreicht.

Dezentral eingesetzte Solarkollektoranlagen, insbesondere Flachkollektoren für die Brauchwassererwärmung und die Beheizung von Schwimmbädern, sind technisch inzwischen nahezu ausgereift. Dies schlägt sich auch darin nieder, daß auf diesem Feld keine nachhaltige Reduktion der Systemkosten mehr erwartet wird. Anders wird dies bei Systemen auf Basis von Vakuumröhrenkollektoren und für solare Nahwärmesysteme gesehen, bei denen sich die gesamten spezifischen Systemkosten bei Ausschöpfung aller Kostenreduktionspotentiale noch um etwa zwei Drittel beziehungsweise zwei Fünftel vermindern könnten. Die Angaben zu den heutigen spezifischen Systemkosten (einschließlich der Installationskosten) schwanken (bei Flachkollektoranlagen) zwischen 900 und 2 000 DM/m<sup>2</sup> sowie bei Anlagen mit Vakuumröhrenkollektoren zwischen 1 100 DM/m<sup>2</sup> für große Prozeßwärmesysteme und 3 000 DM/m<sup>2</sup> für kleine Brauchwassersysteme.

Dezentrale Solar-Kollektoranlagen kommen heute und auf absehbare Zeit unter einzelwirtschaftlichen Aspekten für die Raumheizung von Wohngebäuden kaum in Betracht, sondern bleiben dort weitgehend auf die Warmwasserbereitung beschränkt. Aber auch Systeme zur Warmwasserbereitung sind nach wie vor von ihrer Wirtschaftlichkeitsschwelle deutlich entfernt. Die ökonomisch günstigsten Einsatzchancen haben Solarkollektoranlagen im Bereich der Schwimmbadbeheizung, wo sie schon heute konkurrenzfähig sind. Nahe an der Wirtschaftlichkeitsschwelle befinden sich auch kleinere solare Nahwärmesysteme, die sich auf einen moderaten Deckungsbeitrag bei der Wärmebereitstellung beschränken. Bei großen solaren Nahwärmesystemen mit hohem Deckungsanteil sind die spezifischen Kosten noch doppelt so hoch, so daß hier erst langfristig mit wirtschaftlich attraktiven Einsatzmöglichkeiten gerechnet werden kann.

### 3.2.8 Wärmepumpen

Unter gleichzeitiger Zuführung hochwertiger Energie ist es mit Hilfe von Wärmepumpen möglich, nieder-

wertige Energie aus einer der größten erneuerbaren Energiequellen, nämlich der Umweltwärme zu schöpfen und in nutzbare Wärme, hauptsächlich im Niedertemperaturbereich, umzuwandeln. Theoretisch haben deshalb Wärmepumpen das Potential, den gesamten Bedarf an Niedertemperaturwärme zu decken: In der Bundesrepublik Deutschland (ohne ehemalige DDR) sind dies immerhin etwa 40 Prozent des gesamten Endenergieverbrauchs.

Wärmepumpen unterscheiden sich vor allem im Hinblick auf die Art des Verdichters (mechanische Verdichter bei Kompressionswärmepumpen, thermischer Verdichter bei Absorptionswärmepumpen), die genutzte Art der Umgebungsenergie, das heißt der Wärmequelle (Umgebungsluft, Wasser, Erdreich, Solarstrahlung), die Betriebsweise (monovalent, bivalent) sowie den verwendeten hochwertigen Energieträger (Strom, Dieselöl oder Gas).

Im Vergleich zu konventionellen Heizsystemen bewirken Wärmepumpen in jeweils unterschiedlichem Umfang eine Verminderung des Endenergieverbrauchs (insbesondere Elektrowärmepumpen) wie des Primärenergieverbrauchs (insbesondere Verbrennungsmotorwärmepumpen). Sie können insoweit auch zu einer Reduktion der CO<sub>2</sub>-Emissionen beitragen. Besonders effektiv sind in dieser Hinsicht beim gegenwärtigen Stromerzeugungsmix verbrennungsmotorisch betriebene Wärmepumpen auf Gasbasis.

Die früheren Erwartungen eines rasch zunehmenden Einsatzes von Wärmepumpen haben sich nicht erfüllt. Viele „Kinderkrankheiten“, vor allem das oft fehlende Verständnis und mangelnde Kenntnis beim Installationsgewerbe, konnten den Eindruck einer noch nicht ausgereiften Nutzungstechnik erwecken. Inzwischen dürften diese und ähnliche Probleme tendenziell geringer geworden sein, so daß sie zumindest nicht mehr als ausschlaggebende Hemmnisse den stärkeren Einsatz von Wärmepumpen behindern. Vor allem Kompressionswärmepumpen können inzwischen als technisch ausgereift bezeichnet werden. Ähnliches gilt zwar für Absorptionswärmepumpen, doch muß deren Nutzungsgrad zumindest im Vergleich zum Brennkessel noch deutlich verbessert werden, wenn sie eine tragfähige Alternative darstellen sollen.

Am weitesten verbreitet sind die Elektrowärmepumpen, von denen gegenwärtig für Heizungszwecke rund 56 000 Anlagen für gut 70 000 Wohnungen mit einem Anschlußwert von etwa 380 MW in Betrieb sind. Hinzu kommen beinahe 280 000 elektrische Brauchwasserwärmepumpen. Dagegen dürften lediglich rund 600 bis 700 Verbrennungsmotorwärmepumpenanlagen auf Gas- und Ölbasis sowie vielleicht 200 bis 300 Gas-Absorptionswärmepumpenanlagen existieren. Dabei gibt es für die derzeit angebotenen Wärmepumpenarten typische Leistungsbereiche: Elektrowärmepumpen herrschen im Bereich bis zu etwa 10 bis 20 kW vor, während Absorptionswärmepumpen (abgesehen von großindustriellen Anlagen im MW-Bereich) Leistungen von 20 bis 40 kW abdecken. Verbrennungsmotorwärmepumpen bewegen sich meist in Größenordnungen von 100 kW und mehr.

Insgesamt fehlt es – mangels entsprechender Nachfrage – nach wie vor an einer breiten Erfahrung vor



allem im Bereich der Anlagenplanung und -installation sowie an den Voraussetzungen für eine wirtschaftliche Serienproduktion. Im übrigen haben sich in den vergangenen Jahren mehr und mehr Unternehmen vom Wärmepumpenmarkt zurückgezogen. Dies betrifft in erster Linie Verbrennungsmotor- und Absorptionswärmepumpen, für die es gegenwärtig zumindest für große Teile des potentiellen Einsatzgebietes im Bereich der Wohngebäudebeheizung praktisch kein Marktangebot mehr gibt.

Die wirtschaftlichen Einsatzchancen von Wärmepumpen sind angesichts der gegenwärtigen Energiepreise eher gering. Ihre energetische Leistungsfähigkeit – ausgedrückt durch die jeweiligen Heiz- und Arbeitszahlen – reicht nicht aus, um dies auszugleichen. Bei den heutigen Strom-Öl-Preisrelationen können beispielsweise mit Elektrowärmepumpen vielfach noch nicht einmal Energiekosten eingespart werden. Sollten die Energiepreise in den kommenden Jahren – wie vorgegeben – nur moderat steigen, können sich die wirtschaftlichen Aussichten nur verbessern, wenn es zu einer wesentlichen Reduktion der Investitionskosten und/oder zu einer deutlichen Leistungssteigerung kommt. Dabei wird auch zu berücksichtigen sein, daß Wärmepumpen künftig gegen wesentlich effizientere konventionelle Wärmebereitstellungssysteme konkurrieren müssen. Außerdem muß die Verwendung FCKW-freier Kältemittel angenommen werden können.

### 3.2.9 Fazit

Aus der Analyse des gegenwärtigen Standes der Technik läßt sich folgern, daß der größere Teil der hier behandelten Systeme bereits einen Status erreicht hat, der technisch den Einsatz im Energiemarkt erlaubt. Gleichwohl lassen sich – noch ohne Berücksichtigung wirtschaftlicher Aspekte – unterschiedliche zeitliche Perspektiven für den Einsatz der einzelnen Systeme zur Nutzung erneuerbarer Energiequellen ableiten:

Kurzfristig stehen Wasserkraftwerke, kleine und mittlere Windenergieanlagen, große verbrennungsmotorisch betriebene Wärmepumpen und Elektrowärmepumpen sowie solare Niedertemperaturwärmesysteme, Verbrennungsanlagen für Holz, Stroh, Müll sowie Deponie- und Klärgase, Biogasanlagen und Photovoltaikanlagen auf der Basis von kristallinem Silizium zur Verfügung.

Mittelfristig, das heißt binnen 10 bis 15 Jahren, könnten große Windenergieanlagen, solare Nahwärmesysteme sowie effizientere Verfahren zur Nutzung organischer Abfälle hinzukommen.

Langfristig, das heißt binnen 15 bis 30 Jahren, könnten PV-Anlagen auf der Basis von Dünnschichtzellen, der Import von solarem Strom (auch mittels Supraleitung) und solarem Wasserstoff sowie von nachwachsenden Rohstoffen einen wesentlichen Beitrag leisten.

## 3.3 Technische Potentiale

### 3.3.1 Einsatzgrenzen und Konkurrenzbeziehungen

In den meisten der zum Studienkomplex „Erneuerbare Energiequellen“ erarbeiteten Studien sind zwar technische Potentiale angegeben worden, doch ist deren einfache Summation aus mehreren Gründen nicht möglich: So werden die Potentialbegriffe nicht immer einheitlich verwendet, teilweise wird bereits der Einsatz gezielter energiepolitischer Maßnahmen zugrunde gelegt, teilweise stehen die verschiedenen Systeme auch miteinander in Konkurrenz oder unterliegen bestimmten Nutzungsrestriktionen, die in den Studien nicht immer berücksichtigt werden konnten. Die beiden zuletzt genannten Aspekte gelten – im Unterschied zur relativ kontinuierlich verfügbaren Wasserkraft und zur Verstromung von Biomasse – insbesondere für die Stromerzeugung aus PV-Anlagen und Windenergieanlagen.

In den Einzelstudien schwanken die Angaben über das technische Potential von PV-Strom zwischen rund 20 und 120 TWh/a sowie für die Stromerzeugung aus Windenergie zwischen 200 und 250 TWh/a. Dabei ist zu beachten, daß die technischen Potentiale in diesen Fällen unterschiedlich definiert sind: Während bei der Photovoltaik die Potentialobergrenzen nicht aus Flächen-, sondern ausschließlich aus den unterstellten Netzbegrenzungen resultieren, ergibt sich das Potential bei der Windenergie allein aus der Summe aller verfügbaren windgünstigen Standorte.

Zusammengenommen würde sich für Wind- und PV-Anlagen ein Potential von 220 bis 370 TWh/a ergeben. Ohne zusätzliche Speicherung ist aber ein Stromerzeugungsbeitrag dieser fluktuierenden Energiequellen bei unveränderter Versorgungs- und Nachfragestruktur durch die Aufnahmefähigkeit des Verbundnetzes erheblich begrenzt. Über das Ausmaß derartiger Restriktionen bestehen freilich sehr unterschiedliche Auffassungen. Die Schätzungen über die entsprechenden Anteile an der elektrischen Arbeit schwanken zwischen 6 Prozent und 30 Prozent. Je nach dem gewählten Ansatz errechnen sich somit um Größenordnungen unterschiedliche Stromerzeugungspotentiale für die beiden fluktuierenden Energiequellen Wind und Solarstrom. Eine eindeutige Klärung der hieraus resultierenden Probleme – auch im Hinblick auf möglicherweise zusätzlich erforderliche Investitionen im Netz, aber auch positiver Systemauswirkungen (zum Beispiel für Umspannwerke und Transportleitungen) – war im Rahmen des Studienprogramms nicht möglich. Angesichts der zentralen Bedeutung dieser Frage kann hier nur ein erheblicher Forschungsbedarf konstatiert werden. Für die weiteren Überlegungen wurde unter Berücksichtigung anderer Untersuchungen, deren Ergebnisse auch Eingang gefunden haben in die Studie zu den solaren Großanlagen, vereinfachend ein Anteil von insgesamt 20 Prozent des Stromverbrauchs als Obergrenze des technischen Potentials für die Stromeinspeisung aus Wind- und PV-Anlagen angenommen. Gemessen am gegenwärtigen und in Zukunft erwarteten Stromverbrauch wären dies etwa 90 bis 100 TWh/a. Dabei wird das technische Potential der Windenergie aufgrund der gegenüber den PV-Anlagen wesentlich größeren

Tabelle 6

**Technisches Potential erneuerbarer Energiequellen im Inland zur Strom- und Wärmeerzeugung sowie zur Emissionsminderung klimarelevanter Spurengase <sup>1)</sup>**

Systeme	Stromerzeugungssysteme		Systeme	Wärmeerzeugungssysteme	
	Untere Variante	Obere Variante		Untere Variante	Obere Variante
	Stromerzeugung (Mrd. kWh)			Wärmeerzeugung (PJ)	
Photovoltaik <sup>2)</sup> .....	20	100	Solarkollektoren .....	185	375
Windenergie <sup>3)</sup> .....	200	250	Solare Nahwärme .....	443	443
Summe <sup>4)</sup> .....	100	100	Wärmepumpen .....	295	370
Wasserkraft .....	21	38	Biomasse .....	304	367
Biomasse (KWK) .....	15	17	Summe <sup>5)</sup> .....	1 227	1 555
Summe .....	136	155	Summe <sup>6)</sup> .....	920	1 166
	CO <sub>2</sub> -Emissionen (Mio. t)			CO <sub>2</sub> -Emissionen (Mio. t)	
Photovoltaik <sup>2)</sup> .....	17	83	Solarkollektoren .....	12	24
Windenergie <sup>3)</sup> .....	166	208	Solare Nahwärme .....	28	28
Summe <sup>4)</sup> .....	83	83	Wärmepumpen .....	19	24
Wasserkraft .....	12	22	Biomasse .....	19	23
Biomasse (KWK) .....	9	10	Summe <sup>5)</sup> .....	79	100
Summe .....	104	115	Summe <sup>6)</sup> .....	59	75
	CH <sub>4</sub> -Emissionen (t)			CH <sub>4</sub> -Emissionen (t)	
Photovoltaik <sup>2)</sup> .....	90	450	Solarkollektoren .....	355	719
Windenergie <sup>3)</sup> .....	900	1 125	Solare Nahwärme .....	849	849
Summe <sup>4)</sup> .....	450	450	Wärmepumpen .....	565	709
Wasserkraft .....	76	137	Biomasse .....	583	703
Biomasse (KWK) .....	54	61	Summe <sup>5)</sup> .....	2 352	2 980
Summe .....	580	648	Summe <sup>6)</sup> .....	1 764	2 235
	NMVOC-Emissionen (t)			NMVOC-Emissionen (t)	
Photovoltaik <sup>2)</sup> .....	180	900	Solarkollektoren .....	392	794
Windenergie <sup>3)</sup> .....	1 800	2 250	Solare Nahwärme .....	938	938
Summe <sup>4)</sup> .....	900	900	Wärmepumpen .....	624	783
Wasserkraft .....	129	233	Biomasse .....	643	777
Biomasse (KWK) .....	92	104	Summe <sup>5)</sup> .....	2 597	3 291
Summe .....	1 120	1 237	Summe <sup>6)</sup> .....	1 948	2 469
	NO <sub>x</sub> -Emissionen (1000 t)			NO <sub>x</sub> -Emissionen (1000 t)	
Photovoltaik <sup>2)</sup> .....	12	59	Solarkollektoren .....	6	13
Windenergie <sup>3)</sup> .....	118	147	Solare Nahwärme .....	15	15
Summe <sup>4)</sup> .....	59	59	Wärmepumpen .....	10	12
Wasserkraft .....	9	16	Biomasse .....	10	12
Biomasse (KWK) .....	6	7	Summe <sup>5)</sup> .....	41	52
Summe .....	74	81	Summe <sup>6)</sup> .....	31	39

<sup>1)</sup> Emissionsrechnung bei Stromerzeugungssystemen für Photovoltaik und Wind gegenüber Steinkohlenkraftwerken (angenommener Wirkungsgrad 40 %), für Wasser und Biomasse gegenüber Stromerzeugungsmix; bei Wärmebereitstellungssystemen im Vergleich zu einem Mix von Öl- und Gaszentralheizungen.

<sup>2)</sup> Potential einschließlich netzseitiger Restriktionen.

<sup>3)</sup> Potential an allen verfügbaren, windgünstigen Standorten; ohne Netzrestriktionen.

<sup>4)</sup> Summe aus Photovoltaik und Wind unter Berücksichtigung von Netzrestriktionen.

<sup>5)</sup> Summe der Einzelpotentiale.

<sup>6)</sup> Bereinigte Werte mit einem Abschlag von einem Viertel auf die Summe der Einzelpotentiale zur Berücksichtigung von Substitutionsbeziehungen zwischen den erneuerbaren Systemen zur Wärmebereitstellung.

Standortgebundenheit — nämlich an windgünstige Regionen — auf etwa 30 TWh/a begrenzt. Unter dieser Voraussetzung würde für den direkt genutzten Strom aus PV-Anlagen ein technisches Potential von rund 70 TWh/a bleiben. Zusätzliche Potentiale ließen sich aber durch die Einbeziehung des europäischen Verbundnetzes oder — allerdings sehr kostenintensiver — speichergestützter Systeme im Inland sowie durch die Importmöglichkeiten elektrischer Energie auf Basis von PV-, Solarturm- und/oder Solarfarmanlagen erschließen.

Konkurrenzbeziehungen bestehen aber nicht nur zwischen Windenergie und Solarstrom, sondern auch bei den Nutzungssystemen erneuerbarer Energiequellen, die Wärme bereitstellen. Dies betrifft dezentrale Solarkollektoranlagen, solare Nahwärmesysteme, Anlagen zur Nutzung von Biomasse und Wärmepumpen, die erheblich zur Deckung vor allem des Raumwärme- und Warmwasserbedarfs beitragen. Aufgrund des begrenzten Detaillierungsgrades bei den vorliegenden Einzelstudien konnten die Summenwerte nicht um den genannten Konkurrenzeffekt bereinigt werden. Im folgenden wird deshalb vereinfachend mit einem pauschalen Abschlag von etwa einem Viertel der Potentialwerte gerechnet, die sich als Summe aus den Einzelstudien ergeben.

### 3.3.2 Technisches Potential der Systeme zur Stromerzeugung

Das technische Potential aller im Inland installierten Systeme zur Nutzung erneuerbarer Energiequellen zur Stromerzeugung kann nahezu durchgängig auf etwa 136 bis gut 155 TWh/a geschätzt werden. Das sind, bezogen auf die heutige Bruttostromerzeugung in der Bundesrepublik Deutschland (ohne ehemalige DDR, etwa 30 bis 36 Prozent (vgl. Tab.6). Den größten Teil des Stromerzeugungsbeitrages würden dabei die Photovoltaik (bei gegebener Netzrestriktion max. 70 TWh/a) und die Windenergie (maximal 30 TWh/a) leisten. Das Potential der Wasserkraft wird auf bis zu 38 TWh/a veranschlagt, gegenüber der heutigen Nutzung sind das bis zu 20 TWh/a mehr. Das Potential der Stromerzeugung aus Biomasse liegt bei 15 bis 17 TWh/a. Mögliche Stromimporte sind in diesen Angaben nicht enthalten. Würde dieses technische Stromerzeugungspotential ausgeschöpft, ließen sich CO<sub>2</sub>-Emissionen zwischen 104 und 115 Millionen Tonnen/a vermeiden. Bezogen auf das heutige Gesamtemissionsniveau von rund 715 Millionen Tonnen CO<sub>2</sub>, sind das etwa 15 bis 16 Prozent. Die CH<sub>4</sub>-Emissionen könnten um 580 bis knapp 650 Tonnen, die NMVOC-Emissionen um 1 120 bis 1 240 Tonnen und die NO<sub>x</sub>-Emissionen um 74 000 bis 81 000 Tonnen reduziert werden. Hier — wie im weiteren — ist zu beachten, daß in den Zahlen der heutige Stromerzeugungsbeitrag der Wasserkraft und damit die dadurch schon vermiedenen CO<sub>2</sub>-Emissionen in Höhe von etwa 10 Millionen Tonnen enthalten sind.

### 3.3.3 Technisches Potential der Systeme zur Wärmeerzeugung

Das um Konkurrenzeffekte bereinigte (s.o.) technische Potential aller erneuerbaren Energiequellen zur

Wärmebereitstellung bewegt sich in einer Größenordnung von 920 und 1.200 PJ/a. Gegenüber dem heutigen Endenergieverbrauch zur Deckung des Niedertemperaturwärmebedarfs (Raumwärme und Warmwasser; 1987: 2.993 PJ) entspricht dies einem Anteil von etwa 30 bis 40 Prozent. Wie Tabelle 6 zu entnehmen ist, verteilt sich dieses Potential verhältnismäßig gleichmäßig auf die in diesem Bereich maßgeblichen Systeme (Biomasse, dezentrale Solarkollektoren, solare Nahwärme, Wärmepumpen).

Durch die Wärmebereitstellung in der genannten Höhe ließen sich CO<sub>2</sub>-Emissionen, die sonst bei den zumeist konkurrierenden konventionellen Öl- und Gaskesseln beziehungsweise -thermen entstehen würden, in Höhe von rund 60 bis 75 Millionen Tonnen vermeiden; gegenüber den heutigen CO<sub>2</sub>-Emissionen also um 8 bis 11 Prozent. Die CH<sub>4</sub>-Emissionen könnten um 1 760 bis 2 235 Tonnen, die NMVOC-Emissionen um 1950 bis 2470 Tonnen und die NO<sub>x</sub>-Emissionen um gut 30000 bis knapp 40000 Tonnen gesenkt werden.

Bei diesen Angaben sind wiederum die längerfristig erheblichen Minderungspotentiale durch die Brenn- und Treibstoffbereitstellung auf Basis solar erzeugten gasförmigen und flüssigen Wasserstoffs sowie nachwachsender Rohstoffe nicht berücksichtigt.

### 3.3.4 Technisches Potential aller Systeme

Insgesamt läßt sich das technische Potential der CO<sub>2</sub>-Emissionsreduktion auf rund 163 bis 190 Millionen Tonnen veranschlagen. Allein mit Hilfe erneuerbarer Energiequellen in der Bundesrepublik Deutschland — ohne Importe — erscheint es unter technischen Gesichtspunkten demnach als möglich, das gegenwärtige Emissionsniveau um etwa 23 bis 27 Prozent zu senken, wenn man diese technische Option für sich genommen betrachtet. Rechnet man die bereits heute durch Wasserkraft vermiedenen CO<sub>2</sub>-Emissionen heraus, ändern sich diese Relationen nur marginal. Die erneuerbaren Energiequellen haben daher das technische Potential, einen wesentlichen Beitrag zu der geforderten Emissionsverminderung nicht nur des CO<sub>2</sub>, sondern auch anderer klimarelevanter Spurengase zu leisten. Zusätzliche Potentiale ließen sich noch durch die Einbeziehung solar- und biomassegestützter Energieimporte erschließen. Prinzipiell haben solche Systeme aus technischer Sicht ein Potential, das — gemessen an der Größenordnung des zu deckenden Energiebedarfs — diesen um ein Vielfaches übersteigt.

## 3.4 Wirtschaftliche Potentiale

### 3.4.1 Zur Konkurrenzfähigkeit erneuerbarer Energiequellen

Angaben zum technischen Potential erlauben noch keine Aussagen über deren wirtschaftliche Realisierbarkeit, das heißt über die Konkurrenzfähigkeit erneuerbarer Energiequellen. Diese hängt einerseits von den Kosten ihrer Nutzungssysteme, andererseits von den Kosten und Preisen der zu ersetzenden konventionellen Techniken und Energieträger ab. Hin-

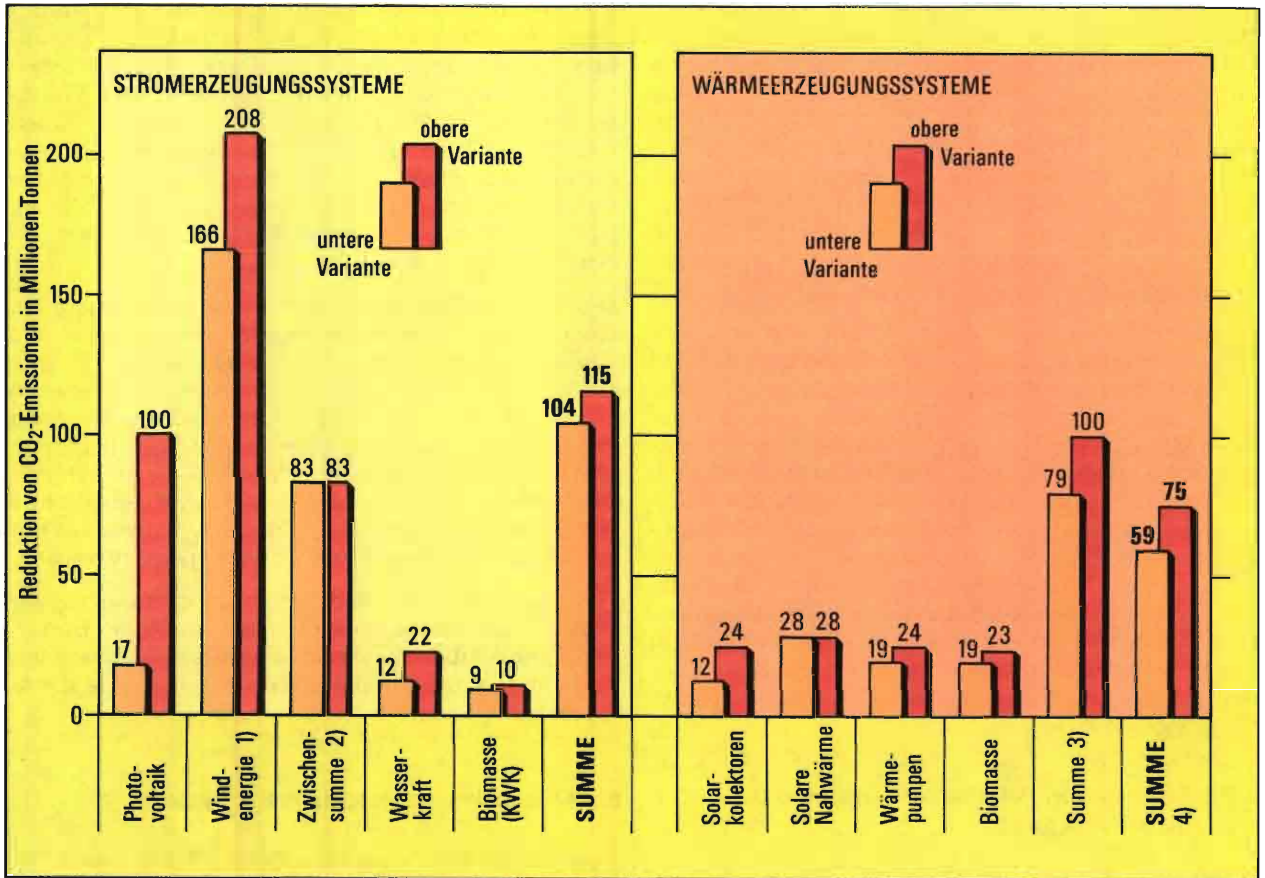


Abb. 9: Technisches Potential erneuerbarer Energiequellen zur CO<sub>2</sub>-Emissionsminderung

- 1) ohne Netzrestriktionen
- 2) Summe aus Photovoltaik und Windenergie unter Berücksichtigung von Netzrestriktionen
- 3) Summe der Einzelpotentiale
- 4) Summe unter Berücksichtigung von Substitutionsbeziehungen

sichtlich der Entwicklung der Energieträgerpreise wurde die vorgegebene, eher moderate Verteuerung bis zum Jahre 2010 zugrunde gelegt (vgl. Tab.1). Die im Rahmen des Studienprogramms durchgeführten Wirtschaftlichkeitsrechnungen haben sich meist auf den Zeitraum bis 2005 beschränkt. Darüber hinausgehende Aussagen sind wegen den damit verbundenen steigenden Unsicherheiten ohnehin nur mit größten Vorbehalten möglich. Andererseits besteht aber auch keine Sicherheit darüber, daß die teilweise angenommenen drastischen Kostenreduktionen für Systeme zur Nutzung erneuerbarer Energiequellen in der Realität – und binnen der nächsten 15 Jahre – auch erreicht werden können, zumal dann, wenn sie ohne eine grundlegend gewandelte Energiepolitik ohnehin nicht vorstellbar sind.

Wie die Wirtschaftlichkeitsanalysen der erneuerbaren Energiequellen zur Stromerzeugung gezeigt haben, kann die Nutzung der Wasserkraft – wenn auch nicht ohne Einschränkungen – gegenüber konventionellen Systemen als konkurrenzfähig bezeichnet werden. Vergleichsweise günstig stellt sich die Situation auch bei Systemen dar, die Biomasse in Kraft-Wärme-Kopplungsanlagen zur Stromerzeugung verwenden (zum Beispiel Biogas, Deponiegas, Klärgas, Müllver-

brennung), zumal hier häufig noch Gesichtspunkte der Abfallverwertung hinzukommen. Hierfür werden schon heute teilweise Stromerzeugungskosten von 0,13 bis 0,15 DM/kWh erreicht. Da auf diesem Gebiet künftig kaum mit wesentlichen realen Kostensteigerungen gerechnet werden kann (eher mit einer Verminderung), dürften diese Systeme zunehmend konkurrenzfähig werden.

Differenzierter sind die Photovoltaik und die Windenergie zu behandeln. Wichtig für die Bewertung ihrer Konkurrenzfähigkeit ist der Vergleichsmaßstab. Häufig werden ihre Stromgestehungskosten den Vollkosten konventioneller Kraftwerke gegenübergestellt. Aus der Sicht von Kraftwerksbetreibern wäre das aber nur dann richtig, wenn sie auch ein vollständiges Substitut darstellen würden. Dies ist jedoch – anders als bei der Wasserkraft und den biomassegestützten Systemen – zumindest bei speicherlosen PV-Anlagen nicht und bei Windenergiesystemen nur teilweise der Fall. Daraus folgt aber, daß deren Stromerzeugung zunächst einmal nur die variablen Kosten eines konventionellen Kraftwerks „einspart“ und – wie bei der Windenergie – noch einen Teil der Fixkosten (entsprechend der durch den Bau von Windkraftwerken durch Gleichzeitigkeitseffekte ver-

miedenen Anlagen- und Instandhaltungsinvestition für konventionelle Kraftwerke). Diese – weitgehend naturbedingte – Situation bedeutet eine erhebliche wirtschaftliche Restriktion, die allerdings von den reinen Stromerzeugungsunternehmen enger gesehen wird als von privaten Eigenerzeugern und Stadtwerken.

Etwas anders stellt sich die Lage für einen Betreiber einer PV-oder Windenergieanlage dar, der den größten Teil des erzeugten Stroms selbst verwenden und damit seine (gegenüber den reinen Stromgestehungskosten wesentlich höheren) Strombezugskosten vermindern kann. Allerdings lassen die Studien den Schluß zu, daß das Potential derartiger Nutzungen sehr beschränkt ist, so daß für einen energiewirtschaftlich relevanten Einsatz in erster Linie nur der kraftwerksähnliche Betrieb in Betracht kommt.

Legt man als Indikator für die variablen Kosten der Stromerzeugung in Steinkohlenkraftwerken lediglich die spezifischen Brennstoffkosten (Inlandskohle einerseits, Importkohle andererseits) zugrunde, so dürfte der kraftwerksähnliche Einsatz der Photovoltaik selbst bei der dafür unterstellten drastischen Kostenreduktion bis weit in das nächste Jahrhundert hinein nicht wettbewerbsfähig werden. Günstiger könnte es allenfalls bei einer weitgehenden Eigenversorgung aussehen. Insgesamt dürfte sich bei unveränderten energiewirtschaftlichen Rahmenbedingungen für die Photovoltaik – eine eher konservative Annahme – vermutlich erst nach 2020 ein wirtschaftliches Potential in energiewirtschaftlich relevantem Maßstab ergeben. Dies setzt aber in jedem Fall voraus, daß der skizzierte Übergang auf die Großserienproduktion gelingt.

Aus wirtschaftlicher Sicht ist die Windenergie weitaus positiver zu bewerten: Bei günstigen Windverhältnissen (für die die Standortzahl indes begrenzt ist) sowie optimaler Auslegung kann sie schon heute vergleichsweise niedrige Stromgestehungskosten erreichen. Bei kraftwerksähnlichem Betrieb erscheint noch in diesem Jahrhundert eine Konkurrenzfähigkeit denkbar, sofern man die Verstromung von inländischer Steinkohle als maßgebliches Substitut ansieht und berücksichtigt, daß Windkraftanlagen aufgrund von Gleichzeitigkeitswirkungen im Netzverbund auch eine Leistungsgutschrift beanspruchen können. Unterstellt man allerdings – vermutlich zutreffender –, daß die Windenergie gegen Importkohle konkurriert (beziehungsweise gegen den auf Weltmarktpreise hinunter subventionierten Preis für Inlandskohle), so trifft dies bei der hier angenommenen Energiepreisentwicklung und bei Anrechnung der zustehenden Leistungsgutschrift erst für die Zeit nach 2005 zu. Immerhin dürfte sich die Windenergie in besonders günstigen Regionen schon bald in bestimmtem Umfang auch wirtschaftlich behaupten können, wobei die Höhe der Leistungsgutschrift, die weitgehend vom Anteil der gesicherten Leistung (und zwar der Windkraftanlagen im Netzverbund, nicht der Einzelanlage) abhängt, eine wesentliche Rolle spielt.

Erneuerbare Energiequellen für die Wärmebereitstellung „leiden“ gegenwärtig besonders stark unter den gegenüber Anfang der achtziger Jahre niedrigen Preisen der konkurrierenden Energieträger. Da deren

Nutzungssysteme überdies meist sehr viel kapitalintensiver als ihre konkurrierenden konventionellen Techniken sind und oftmals nur Brennstoffkosten „sparen“ (fuel-saver), ergeben sich derzeit im allgemeinen nur wenige wirtschaftliche Einsatzmöglichkeiten. Dies gilt für fast alle Formen der direkten Biomassenutzung, für dezentrale Solarkollektoren zur Warmwasserbereitung und Raumheizung, für große solare Nahwärmesysteme sowie für Wärmepumpen in Wohngebäuden. Zu den wenigen Ausnahmen zählen einfache Solarkollektoren zur Schwimmbadbeheizung sowie unter günstigen Voraussetzungen die Klärgas- und Deponiegasnutzung, die Verfeuerung von Restholz sowie der Einsatz von großen, verbrennungsmotorisch betriebenen Wärmepumpen, zum Beispiel in größeren Gebäuden mit einem ganzjährig hohen Wärmebedarf, in Hallenbädern und bei Eisbahnen. Vergleichsweise nahe an der Wirtschaftlichkeitsschwelle befinden sich nach den dazu vorliegenden Modellrechnungen auch solare Nahwärmesysteme mit einem relativ niedrigen solaren Deckungsgrad.

Angesichts der vorgegebenen moderaten Energiepreisverteuerung (vgl. Tab.1) ist nach den Studienergebnissen bei unveränderten Rahmenbedingungen auch bis zum Jahre 2005 noch mit keinem breiten wirtschaftlichen Durchbruch der Systeme zu rechnen. Erst wenn man unterstellt, daß sich die Preise konkurrierender Energieträger über 2005 hinaus dauerhaft mindestens mit jährlichen Raten erhöhen, wie sie für die Periode von 1987 bis 2010 angesetzt worden sind, wächst die Nutzung der erneuerbaren Energiequellen mehr und mehr in wirtschaftliche Bereiche hinein. Ihre wirtschaftlichen Perspektiven liegen somit weniger in der Periode bis 2005, sondern eröffnen sich erst danach in größerem Umfang. Aber auch diese günstigen langfristigen Chancen werden nur dann genutzt werden können, wenn schon in der Periode bis 2005 ein entsprechender energiepolitischer Anstoß gegeben wird.

### 3.4.2 Wirtschaftliche Potentiale für Stromerzeugungssysteme

Bei den Stromerzeugungssystemen können im Jahre 2005 insgesamt etwa 28 bis 36 TWh dem wirtschaftlichen Potential zugerechnet werden (vgl. Tab.7); im Jahre 2025 könnten es 42 bis 53 TWh sein. Für 2050 kommt eine grobe überschlägige Rechnung zu einem wirtschaftlichen Potential in einer Größenordnung von 60 bis 120 TWh. Die Photovoltaik, die erst nach 2025 zum wirtschaftlichen Potential gezählt werden dürfte, könnte Mitte des kommenden Jahrhunderts dazu vermutlich den größten Beitrag leisten, gefolgt von der Windenergie, der Wasserkraft und der Biomasse.

Bei vollständiger Ausschöpfung dieser wirtschaftlichen Stromerzeugungspotentiale könnten CO<sub>2</sub>-Emissionen bis 2005 von 17 bis 22 Millionen Tonnen und bis Mitte des kommenden Jahrhunderts von rund 40 bis 80 Millionen Tonnen vermieden werden (vgl. Tab.7, der auch die Veränderungen der CH<sub>4</sub>-, NMVOC- und NO<sub>x</sub>-Emissionen zu entnehmen sind).

Tabelle 7

**Wirtschaftliches Potential erneuerbarer Energiequellen zur Stromerzeugung und  
Wärmebereitstellung sowie zur Emissionsminderung klimarelevanter Spurengase<sup>1)</sup>  
in den Jahren 2005 und 2050**

Systeme	Stromerzeugungssysteme				Systeme	Wärmebereitstellungssysteme			
	2005		2050			2005		2050	
	von	bis	von	bis		von	bis	von	bis
	Stromerzeugung (TWh)					Wärmeerzeugung (PJ)			
Photovoltaik .....	0	0	10	50	Solarkollektoren .....	2	14	150	299
Windenergie .....	1	4	12	30	Solare Nahwärme .....	40	40	443	443
Summe .....	1	4	22	80	Wärmepumpen .....	10	40	150	220
Wasserkraft .....	21	24	24	24	Biomasse .....	104	138	210	311
Biomasse (KWK) .....	6	8	13	14	Summe <sup>2)</sup> .....	156	232	953	1 273
Summe .....	28	36	59	118	Summe <sup>3)</sup> .....	117	174	715	955
	CO <sub>2</sub> -Emissionen (Mio. t)					CO <sub>2</sub> -Emissionen (Mio. t)			
Photovoltaik .....	0	0	7	37	Solarkollektoren .....	0	1	10	19
Windenergie .....	1	3	9	22	Solare Nahwärme .....	3	3	28	28
Summe .....	1	3	16	59	Wärmepumpen .....	1	3	10	14
Wasserkraft .....	12	14	14	14	Biomasse .....	7	9	13	20
Biomasse (KWK) .....	4	5	8	8	Summe <sup>2)</sup> .....	10	15	61	81
Summe .....	17	22	38	81	Summe <sup>3)</sup> .....	7	11	46	61
	CH <sub>4</sub> -Emissionen (t)					CH <sub>4</sub> -Emissionen (t)			
Photovoltaik .....	0	0	40	200	Solarkollektoren .....	4	27	288	573
Windenergie .....	5	18	48	120	Solare Nahwärme .....	77	77	849	849
Summe .....	5	18	88	320	Wärmepumpen .....	19	77	288	422
Wasserkraft .....	76	86	86	86	Biomasse .....	199	265	403	596
Biomasse (KWK) .....	22	29	47	50	Summe <sup>2)</sup> .....	299	445	1 827	2 440
Summe .....	102	133	221	457	Summe <sup>3)</sup> .....	224	334	1 370	1 830
	NMVOC-Emissionen (t)					NMVOC-Emissionen (t)			
Photovoltaik .....	0	0	80	400	Solarkollektoren .....	4	30	318	633
Windenergie .....	9	36	96	240	Solare Nahwärme .....	85	85	938	938
Summe .....	9	36	176	640	Wärmepumpen .....	21	85	318	466
Wasserkraft .....	129	147	147	147	Biomasse .....	220	292	445	658
Biomasse (KWK) .....	37	49	80	86	Summe <sup>2)</sup> .....	330	491	2 017	2 695
Summe .....	174	232	402	873	Summe <sup>3)</sup> .....	248	368	1 513	2 021
	NO <sub>x</sub> -Emissionen (1 000 t)					NO <sub>x</sub> -Emissionen (1 000 t)			
Photovoltaik .....	0	0	5	26	Solarkollektoren .....	0	0	5	10
Windenergie .....	1	2	6	16	Solare Nahwärme .....	1	1	15	15
Summe .....	1	2	11	42	Wärmepumpen .....	0	1	5	7
Wasserkraft .....	9	10	10	10	Biomasse .....	3	5	7	10
Biomasse (KWK) .....	2	3	5	6	Summe <sup>2)</sup> .....	5	8	32	42
Summe .....	12	15	27	57	Summe <sup>3)</sup> .....	4	6	24	32

<sup>1)</sup> Emissionsrechnung bei Stromerzeugungssystemen für Photovoltaik und Wind gegenüber Steinkohlenkraftwerken (angenommener Wirkungsgrad 2005: 40 %; 2050, 45 %, für Wasser und Biomasse gegenüber Stromerzeugungsmix; bei Wärmebereitstellungssystemen im Vergleich zu einem Mix von Öl- und Gaszentralheizungen.

<sup>2)</sup> Summe der Einzelpotentiale

<sup>3)</sup> Bereinigte Werte mit einem Abschlag von einem Viertel auf die Summe der Einzelpotentiale zur Berücksichtigung von Substitutionsbeziehungen zwischen den erneuerbaren Systemen zur Wärmebereitstellung.

### 3.4.3 Wirtschaftliche Potentiale der Wärmebereitstellungssysteme

Bei den Wärmebereitstellungssystemen (einschließlich der Brennstoffbereitstellung durch Biomasse) ist das wirtschaftliche Potential im Jahre 2005 mit einem Umfang von knapp 120 bis etwa 175 PJ ebenfalls begrenzt (vgl. Tab.7). Bis zum Jahre 2025 erhöht es sich auf knapp 560 bis 700 PJ und bis 2050 auf rund 710 bis 960 PJ. Den bedeutsamsten wirtschaftlichen Beitrag könnte zunächst die Biomasse (darunter insbesondere zusätzliche Mengen an Hausmüll, Deponie- und Klärgas) leisten. Erst nach 2005 übernehmen die übrigen Systeme zunehmende Versorgungsbeiträge.

Dem energetisch bewerteten wirtschaftlichen Potential der erneuerbaren Energiequellen zur Wärmebereitstellung entspricht eine Reduktion der CO<sub>2</sub>-Emissionen um 7 bis 11 Millionen Tonnen im Jahre 2005, um knapp 40 bis 50 Millionen Tonnen im Jahre 2025 und von knapp 50 bis gut 60 Millionen Tonnen im Jahre 2050 (zu den übrigen Spurengasen vgl. Tab.7).

### 3.4.4 Wirtschaftliche Potentiale insgesamt

Das wirtschaftliche Potential aller erneuerbaren Energiequellen zusammen (aber ohne den denkbaren Beitrag in- und ausländischer solarer Großanlagen und ohne nachwachsende Rohstoffe) zur CO<sub>2</sub>-Emissionsminderung kann für 2005 auf 24 bis 33 Millionen Tonnen veranschlagt werden (vgl. Tab. 8 und Abb. 10). Im Vergleich zum heutigen Emissionsniveau insgesamt bedeutet dies einen Rückgang um reichlich drei bis nahezu fünf Prozent. Bis 2025 nimmt das Reduktionspotential aber schon auf 66 bis 85 Millionen Tonnen CO<sub>2</sub> und bis 2050 auf 84 bis 142 Millionen Tonnen CO<sub>2</sub> zu. Bis Mitte des kommenden Jahrhunderts könnten also – bezogen auf die derzeitige Situation – CO<sub>2</sub>-Emissionen um 12 bis 20 Prozent vermieden werden. Es sei daran erinnert, daß in diesen Angaben die heutige Wasserkraftnutzung enthalten ist.

Diese Zahlen lassen erkennen, daß die erneuerbaren Energiequellen unter wirtschaftlichen Aspekten auf mittlere Sicht – also bis etwa 2005 – nur einen vergleichsweise geringen Beitrag zur Emissionsminderung von CO<sub>2</sub> und anderen klimarelevanten Spurengasen leisten können. Wirtschaftlich verfügbar dürften bis dahin unter allen Stromerzeugungssystemen in erster Linie Wasserkraftwerke, Kraft-Wärme-Kopplungsanlagen zur Nutzung von Biomasse sowie kleinere und mittlere Windenergieanlagen sein. Bei den Wärmebereitstellungssystemen sind es insbesondere Anlagen zur Nutzung von Biomasse (Holz- und Strohverbrennung, Wärme aus Kraft-Wärme-Kopplung), Solarkollektoren für Schwimmbäder, kleine solare Nahwärmesysteme sowie (verbrennungsmotorisch betriebene) Wärmepumpen in größeren Wohngebäuden und im gewerblichen Bereich.

Langfristig erscheinen die wirtschaftlichen Aussichten für die erneuerbaren Energiequellen aber als erheblich günstiger. Die zuvor genannten Systeme, die bereits in der ersten Phase bis 2005 marktreif werden, können bei einer weiteren Kostenreduktion sowie bei

den zu erwartenden fortgesetzten Preissteigerungen der konkurrierenden konventionellen Energieträger zunehmende Wettbewerbsvorteile erlangen und zusätzliche Marktanteile bis in die Nähe ihres technischen Potentials übernehmen. Insbesondere ist bei den Stromerzeugungssystemen für die Windenergie und – zeitlich auf das Ende des Betrachtungszeitraumes versetzt – für die Photovoltaik mit sich rasch vergrößernden wirtschaftlichen Potentialen zu rechnen.

### 3.4.5 Wirtschaftliche Potentiale bei höheren Energiepreisen

Die hier skizzierten Ergebnisse zum wirtschaftlichen Potential der erneuerbaren Energiequellen sind stets nur vor dem Hintergrund der jeweiligen Annahmen zu interpretieren. Einerseits ist daran zu erinnern, daß bei einigen Nutzungssystemen von sehr optimistischen Voraussetzungen hinsichtlich ihrer Kostenreduktionsmöglichkeiten und der dafür unterstellten Produktionsbedingungen ausgegangen worden ist. Andererseits sind aber insbesondere die moderaten Preisvorgaben hervorzuheben, die zu einer oft sehr ungünstigen wirtschaftlichen Bewertung der erneuerbaren Energiequellen führen. Preispolitische Maßnahmen dürften aber angesichts der immer noch bestehenden externen Kosten durch die Energieversorgung und nicht internalisierter staatlicher Vorsorgeleistungen sowie angesichts des zu lösenden Klimaproblems unverzichtbar werden. Es schien deshalb angeraten, die Wirtschaftlichkeit der erneuerbaren Energiequellen einmal in Abhängigkeit von höheren Energiepreisen zu überprüfen. Angenommen, die Preise fossiler Energieträger wären im Jahre 2005 um 15 DM/GJ höher als im Referenzfall und die Strompreise um 7 Pf/kWh höher, wäre bis dahin ein Stromerzeugungsbeitrag der erneuerbaren Energiequellen in einem Umfang von rund 40 bis beinahe 50 TWh wettbewerbsfähig. Bis 2050 könnte er sich auf 90 bis 130 TWh steigern. Bei den Wärmebereitstellungssystemen wären es im Jahre 2005 knapp 500 bis 680 PJ und Mitte des kommenden Jahrhunderts 900 bis fast 1100 PJ.

Demnach erschiene es unter veränderten Preisannahmen bis zum Jahre 2005 als möglich, CO<sub>2</sub>-Emissionen statt von 24 bis 33 Millionen Tonnen von 55 bis 74 Millionen Tonnen, also etwa um das 2,5-fache, zu vermeiden (vgl. dazu auch Tab.8). Bezogen auf das heutige Niveau der CO<sub>2</sub>-Emissionen würde das eine Reduktion um etwa 8 bis 10 Prozent bedeuten. Nach 2005 schwächen sich die Wirkungen der Preisanhebungen ab, da schon im Referenzfall die technischen Potentiale zunehmend wirtschaftlich werden. Immerhin könnten im Jahre 2050 die CO<sub>2</sub>-Emissionen um fast 120 bis 160 Millionen Tonnen, statt um 84 bis 142 Millionen Tonnen, niedriger ausfallen, also etwa 16 bis 22 Prozent der heutigen Emissionen.

Diese Überlegungen zeigen, daß das wirtschaftliche Potential der erneuerbaren Energiequellen spürbar auf die jeweils getroffenen Preisannahmen reagiert. Von daher scheinen preispolitische Maßnahmen auch ein wirksames Instrument zur Förderung ihres verstärkten Einsatzes zu sein. Allerdings ist in jedem Fall

Tabelle 8

**Technische und wirtschaftliche Potentiale der erneuerbaren Energiequellen im Inland zur Strom- und Wärmeerzeugung sowie zur Emissionsminderung klimarelevanter Spurengase insgesamt bei vorgegebener, moderater Preisentwicklung sowie bei höherer Energiepreissteigerung**

	Technisches Potential		Wirtschaftliches Potential			
	von	bis	2005		2050	
			von	bis	von	bis
<b>A) Bei moderater Preisentwicklung (vgl. Tabelle 6)</b>						
<b>Stromerzeugungssysteme</b>						
Stromerzeugung (Mrd. kWh) . . . . .	136	155	28	36	59	118
CO <sub>2</sub> -Emissionen (Mio. t) . . . . .	104	115	17	22	38	81
CH <sub>4</sub> -Emissionen (t) . . . . .	580	648	102	133	221	457
NMVOC-Emissionen (t) . . . . .	1 120	1 237	174	232	402	873
NO <sub>x</sub> -Emissionen (1 000 t) . . . . .	74	81	12	15	27	57
<b>Wärmeerzeugungssysteme</b>						
Wärmeerzeugung (PJ) . . . . .	920	1 166	117	174	715	955
CO <sub>2</sub> -Emissionen (Mio. t) . . . . .	59	75	7	11	46	61
CH <sub>4</sub> -Emissionen (t) . . . . .	1 764	2 235	224	334	1 370	1 830
NMVOC-Emissionen (t) . . . . .	1 948	2 469	248	368	1 513	2 021
NO <sub>x</sub> -Emissionen (1 000 t) . . . . .	31	39	4	6	24	32
<b>Alle Systeme zusammen</b>						
Energiebereitstellung (PJ) . . . . .	1 410	1 724	218	304	927	1 380
CO <sub>2</sub> -Emissionen (Mio. t) . . . . .	163	190	24	33	84	142
CH <sub>4</sub> -Emissionen (t) . . . . .	2 343	2 883	326	467	1 591	2 287
NMVOC-Emissionen (t) . . . . .	3 068	3 705	422	600	1 915	2 893
NO <sub>x</sub> -Emissionen (1 000 t) . . . . .	104	120	16	21	51	89
<b>B) Bei höherer Energiepreissteigerung<sup>1)</sup></b>						
<b>Stromerzeugungssysteme</b>						
Stromerzeugung (Mrd. kWh) . . . . .	136	155	40	47	89	131
CO <sub>2</sub> -Emissionen (Mio. t) . . . . .	104	115	24	30	60	90
CH <sub>4</sub> -Emissionen (t) . . . . .	580	648	147	179	340	508
NMVOC-Emissionen (t) . . . . .	1 120	1 237	258	319	639	971
NO <sub>x</sub> -Emissionen (1 000 t) . . . . .	74	81	17	21	42	64
<b>Wärmeerzeugungssysteme</b>						
Wärmeerzeugung (PJ) . . . . .	920	1 166	485	682	898	1 082
CO <sub>2</sub> -Emissionen (Mio. t) . . . . .	59	75	31	44	57	69
CH <sub>4</sub> -Emissionen (t) . . . . .	1 764	2 235	930	1 307	1 721	2 074
NMVOC-Emissionen (t) . . . . .	1 948	2 469	1 027	1 443	1 900	2 291
NO <sub>x</sub> -Emissionen (1 000 t) . . . . .	31	39	16	23	30	36
<b>Alle Systeme zusammen</b>						
Energiebereitstellung (PJ) . . . . .	1 410	1 724	627	851	1 218	1 554
CO <sub>2</sub> -Emissionen (Mio. t) . . . . .	163	190	55	74	117	160
CH <sub>4</sub> -Emissionen (t) . . . . .	2 343	2 883	1 077	1 486	2 061	2 582
NMVOC-Emissionen (t) . . . . .	3 068	3 705	1 285	1 762	2 539	3 262
NO <sub>x</sub> -Emissionen (1 000 t) . . . . .	104	120	33	44	72	100

<sup>1)</sup> Brennstoffpreise im Jahre 2005 gegenüber vorgegebenen Preisen plus 15 DM/GJ, Strompreise plus 7 DPf.



zu berücksichtigen, daß selbst bei einer zutreffenden Einschätzung des jeweiligen wirtschaftlichen Potentials in der Realität nicht gleichzeitig auch mit dessen tatsächlich vollständiger Ausschöpfung gerechnet werden kann. Dies ist nicht allein darin begründet, daß potentielle Investoren unter gegebenen Bedingungen meist höhere Amortisationsanforderungen haben als sie bei den hier zugrunde liegenden Rechnungen unterstellt worden sind, auch nicht nur darin,

daß individuelle Investitionsentscheidungen nicht immer rein wirtschaftlichen Kriterien folgen und die jeweiligen Reinvestitionszyklen eine schnelle Potentialerschließung nicht erlauben, vielmehr sind Abweichungen zwischen dem wirtschaftlichen Potential und dem Grad seiner Ausschöpfung auch darauf zurückzuführen, daß es zahlreiche andere Hemmnisse für eine stärkere Nutzung der erneuerbaren Energiequellen gibt.

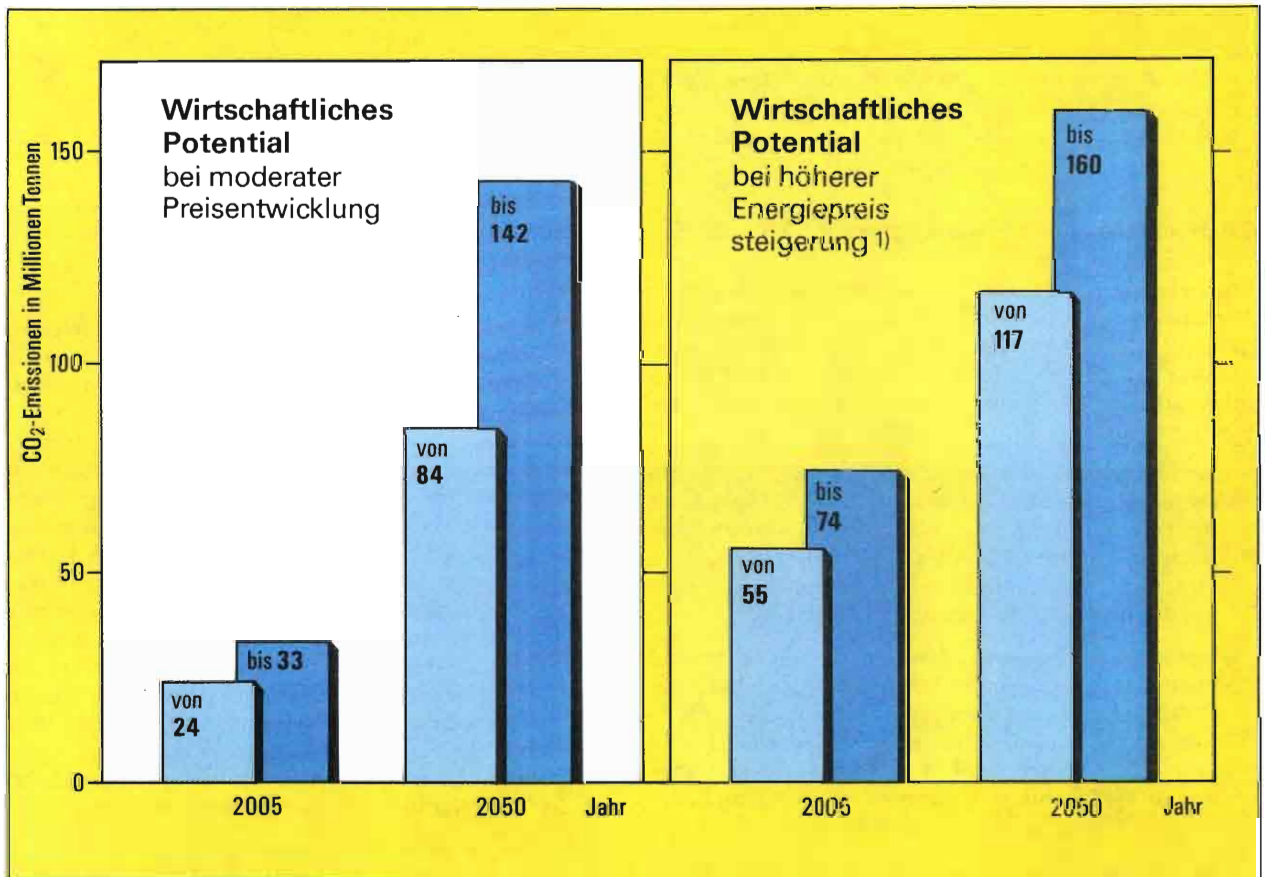


Abb. 10: Technische und wirtschaftliche Potentiale der erneuerbaren Energiequellen im Inland zur Stromerzeugung und Wärmebereitstellung sowie zur Emissionsminderung von CO<sub>2</sub> bei vorgegebener moderater Preisentwicklung sowie bei höherer Energiepreissteigerung

1) Brennstoffpreise im Jahre 2005 gegenüber vorgegebenen Preisen plus 15 DM/GJ, Strompreis plus 7 DPF/KWh

Für die weiter unten diskutierten Reduktionsszenarien (vgl. Kap. 5) wurde eine jeweils unterschiedliche Nutzung der erneuerbaren Energiequellen unter-

stellt. Die folgende Tabelle faßt die wichtigsten Angaben zusammen:

Tabelle 9

### Nutzung erneuerbarer Energiequellen in den verschiedenen Reduktionsszenarien zur Minderung klimarelevanter Spurengase

	Wärme (PJ)	Strom (TWh)
Technisches Potential .....	920 bis 1 166	136 bis 155
Wirtschaftliches Potential		
a) bei vorgegebenen Preisen .....	117 bis 174	28 bis 36
b) bei höheren Preisen .....	485 bis 682	40 bis 47
Ausschöpfung in Szenarien:		
– Reduktionsszenario „Energiepolitik“ .....	384	39
– Reduktionsszenario „Kernenergieausstieg 2005“ .....	727	52
– Reduktionsszenario „Kernenergieausbau“ .....	185	31

### 3.5 Hemmnisse und Erwartungspotential bis 2005

Entsprechend breit wie das Spektrum der einzelnen Techniken und Technologien sind die Hemmnisse, die eine verstärkte Nutzung regenerativer Energiequellen zur Strom- und Wärmeversorgung und deren Integration in das Energiesystem behindern. Zu unterscheiden sind

- „Hemmnisse“, die aufgrund physikalischer, klimatischer beziehungsweise regionaler Eigenarten der regenerativen Energiequellen existieren (zum Beispiel Energiedichte, Fluktuation), und nicht als Hemmnis wirtschaftlicher Anwendungspotentiale verstanden werden können (vgl. Nr.1.1),
- Hemmnisse, die darin bestehen, daß die regenerativen Energiequellen in ein bestehendes Energiesystem eindringen müssen, das durch mangelnde Kenntnisse über die neuen Technologien, traditionelle Verhaltens- und Investitionsmuster, hemmende Gesetze und Richtlinien aus zum Teil historischen Gründen gekennzeichnet ist.

Trotz der bestehenden Hemmnisse wirtschaftlicher Anwendungspotentiale sei aber darauf verwiesen, daß gerade bei den erneuerbaren Energiequellen – anders etwa als bei Maßnahmen zur rationellen Energieverwendung – die heute oft noch mangelnde Konkurrenzfähigkeit die entscheidende Restriktion darstellt.

Unabhängig hiervon hängt die Bedeutung der vorher eingegrenzten Hemmnisse entscheidend vom Umfang eines angestrebten Einführungsprogramms für die erneuerbaren Energiequellen ab. Je größer der gewünschte Beitrag, desto gravierender die Hemmnisse. Die folgenden Überlegungen gehen von der Vorstellung eines nennenswerten Energiebereitstellungsbeitrages durch erneuerbare Energiequellen aus, so daß nur solche Hemmnisse erwähnt werden, die dem entgegenstehen könnten. Der erforderliche Zeitbedarf zum Erreichen größerer Beiträge spielt eine ähnliche Rolle: Auch ein zu schneller (oder zu

langsamer) Ausbau kann Hemmnisse verstärken und langfristige Überwindungsstrategien erforderlich machen.

Die Bewertung von Hemmnissen, die dem Erreichen energiewirtschaftlich relevanter Beiträge der jeweiligen Energietechniken entgegenstehen, setzt gewisse Vorstellungen über Art und Größe der eingesetzten Anlagen voraus, da – je nach absehbarer Mengenkostendegression – andere wirtschaftliche Potentiale eröffnet werden könnten. Bei der Windenergie beispielsweise können größere Beiträge nur durch Windparks und Großanlagen im Megawatt-Bereich bereitgestellt werden. Bei einer nur unwesentlich geänderten Versorgungsstruktur können solche Anlagen nur von EVU betrieben werden. Einspeisebedingungen spielen unter diesen Voraussetzungen ebenso wie die Durchleitungsregelung eine untergeordnete Rolle. Für den erwünschten Privateinsatz kleinerer WEK stellen sie dagegen starke, unter Umständen sogar maßgebliche Hemmnisse dar. Ähnliches gilt praktisch für alle Technologien zur Nutzung erneuerbarer Energiequellen.

Zwei andere wesentliche Hemmnisse für eine breitere Nutzung erneuerbarer Energiequellen sind auszuräumen: Informations- und Beratungsdefizite sowie Akzeptanzprobleme einerseits und Unsicherheit bezüglich der technischen Leistungsfähigkeit der Systeme andererseits.

Wegen ihrer naturbedingten Eigenarten (geringe Energiedichte, schwankendes Angebot) ist ein wirtschaftlich relevanter Beitrag der erneuerbaren Energiequellen nur durch große Stückzahlen oder große Sammler-Flächen zu realisieren. Eine gewisse Nichtakzeptanz ist daher trotz ihrer sonstigen generellen Umweltfreundlichkeit in Zukunft als Hemmnis nicht auszuschließen (und zeichnet sich zum Beispiel bei einigen Windparks heute schon ab). Sie ist durch entsprechende Aufklärungsmaßnahmen zu vermeiden.

Ein generelles Hemmnis muß auch in bisherigen Verhaltens- und Denkmustern, das heißt darin gesehen

werden, daß für konventionelle Kraftwerksbauer heute im allgemeinen 100 kW- Kraftwerke ebenso unwichtig klein sind wie für den konventionellen Heizungsbauer Temperaturspreizungen von nur 5°C. Dieser Umstand führt häufig zu Vorbehalten gegenüber erneuerbaren Energiequellen und zu einer systematischen Unterschätzung ihres potentiellen Versorgungsbeitrages.

Zwei weitere Hemmnisse betreffen ebenfalls fast alle erneuerbaren Energiequellen: Die für einen schnellen und umfangreichen Zubau erforderlichen Produktionskapazitäten sowie genehmigungsrechtliche Behinderungen und Verzögerungen. Zumindest kurzfristig stellt das „Henne-Ei-Problem“, das heißt unzureichende Nachfragevolumina, um in Großserienfertigung investieren zu können, sogar ein starkes „Hemmnis“ dar. Genehmigungsrechtliche Hemmnisse sind beim Wind (insbesondere bei Großanlagen wegen der baurechtlichen und Sicherheitsbestimmungen) und bei den Wasserkraftanlagen (aus wasser- und naturschutzrechtlichen Gründen) größer als bei den anderen erneuerbaren Energiequellen. Aber auch Solarkollektoranlagen begegnen teilweise genehmigungsrechtlichen Vorbehalten.

Die strukturellen und stromspezifischen Hemmnisse können aufgrund ihrer Natur stets nur einen Teil der hier untersuchten neuen Systeme treffen. Die Tatsache, daß meist zentrale Energiesysteme mit zum Ausgleich von Energieangebot und -nachfrage herangezogen werden müssen, bedeutet nur für dezentrale, netzgekoppelte Systeme unter Umständen ein Hemmnis. Dieses Hemmnis kann auch unter der Annahme einer nicht gravierend geänderten Versorgungsstruktur nicht beseitigt, sondern bestenfalls gemildert werden. Auch der Umstand, daß der Investor einer neuer Technik häufig nicht der Nutzer beziehungsweise der alleinige Nutzer der Anlage ist, trifft als mögliches Hemmnis nur die dezentralen Techniken. Hier sind es schwergewichtig die Haustechniken, also die Wärmepumpen und Solarkollektoranlagen, wo die aufgrund der bestehenden Mietverhältnisse im Wohnungsbau gegebenen Hemmnisse nur durch Änderungen im Mietrecht abgebaut werden könnten.

Stromspezifische Hemmnisse beruhen auch auf der Existenz heute noch bestehender Überkapazitäten im Kraftwerkspark. Der dadurch vorerst fehlende Bedarf an weiterer Kraftwerksleistung wirkt sich grundsätzlich auf alle Stromerzeugungstechniken aus. Hiervon dürften aufgrund des damit verbundenen Kapazitätseffektes in erster Linie die Wasserkraft, biomassegestützte KWK-Anlagen und die Windenergie betroffen sein; Systeme also, die die Wirtschaftlichkeit bereits erreicht haben oder ihr schon am nächsten sind.

Oftmals werden wesentliche Hemmnisse auch im Energiewirtschaftsgesetz, in der Bundestarifordnung Elektrizität sowie – generell – in der zentralistischen und monopolistischen Struktur der Elektrizitätswirtschaft gesehen, die nicht zuletzt aufgrund einer personell schwach ausgestatteten Fachaufsicht ausgeprägt ist als zum Beispiel in den USA.

Ein gewisses „Hemmnis“ im Sinne einer ergreifbaren, aber nicht hinreichend aufgegriffenen Maßnahme ist auch die derzeitige F&E-Politik. Dies betrifft vor allem

die Photovoltaik, solare Großanlagen und – wenn auch in etwas geringem Maße – große Windkraftanlagen. Gründe dafür liegen indes weniger in dem Umfang der verfügbaren Haushaltsmittel, sondern in der geforderten hohen Selbstbeteiligungsquote und in den teilweise – insbesondere für kleinere Unternehmen – zu komplizierten und zeitbeanspruchenden Verfahren der Mittelbewilligung. Auch das wirtschaftspolitische Hemmnis einer ungenügenden Anerkennung und mangelnden Förderung wirkt sich negativ auf die erneuerbaren Energiequellen aus. Forschungs- und wirtschaftspolitische Maßnahmen zusammen könnten insbesondere der meist noch fehlenden Wirtschaftlichkeit entgegenwirken.

Unabhängig von den genannten Hemmnissen muß allerdings als entscheidender Hinderungsgrund für eine verstärkte Nutzung erneuerbarer Energiequellen das derzeit und absehbar niedrige Preisniveau der konventionellen Energieträger angesehen werden, solange es die externen Kosten nicht reflektiert. Eine Ausnahme bilden einerseits die noch zubaubaren Wasserkraftwerke, die auch schon jetzt relativ nahe an einer Wirtschaftlichkeit sind, andererseits die Photovoltaik, deren Stromgestehungskosten gegenwärtig noch so weit von der Konkurrenzschwelle entfernt sind, daß selbst ein zum Beispiel durch Energieabgaben drastisch angehobenes Energiepreisniveau allein das Erreichen größerer Versorgungsbeiträge nicht ermöglichen würde.

Angesichts der vorstehend erwähnten Hemmnisse kann unter ansonsten unveränderten energiewirtschaftlichen Rahmenbedingungen sowie unter Berücksichtigung bestimmter Reinvestitionszyklen und Amortisationsansprüche nicht damit gerechnet werden, daß die als wirtschaftlich klassifizierten Potentiale erneuerbarer Energiequellen in der Praxis auch tatsächlich ausgeschöpft werden. Das Erwartungspotential dürfte daher auch in der Regel niedriger als das wirtschaftliche Potential sein – abgesehen von den Fällen eines Pioniermarktes, bei dem es den potentiellen Investoren nicht primär auf die Wirtschaftlichkeit, sondern auf den individuellen Beitrag zur Umweltentlastung ankommt, und von einer durch förderpolitische Maßnahmen induzierten Nutzung. In den zum Komplex „Erneuerbare Energiequellen“ erarbeiteten Studien wurden nur in wenigen Fällen Erwartungspotentiale angegeben; wohl auch deshalb, weil diese entscheidend von der Gesamtheit der kaum vorhersehbaren Rahmenbedingungen bestimmt werden. Dabei spielen die Annahmen über die Höhe der Energiepreise eine wesentliche Rolle. Sollten sich die Energiepreise wie vorgegeben entwickeln, so dürfte im Jahre 2005 das Erwartungspotential – ohne Beseitigung wesentlicher Hemmnisse – allenfalls den unteren Wert für das wirtschaftliche Potential erreichen. Bezogen auf die Stromerzeugung bedeutet dies einen Beitrag von rund 31 TWh (wirtschaftliches Potential: 28 bis 36 TWh), worin die heutige Stromerzeugung aus Wasserkraft und Biomasse (Müll) von rund 22 TWh enthalten ist, und an der Wärmebereitstellung von vielleicht 80 PJ (117 bis 174 PJ). Bezogen auf ihren Beitrag zur Vermeidung von CO<sub>2</sub>-Emissionen kann das Erwartungspotential auf höchstens 20 Millionen Tonnen (24 bis 33 Millionen Tonnen CO<sub>2</sub>) veranschlagt werden; also auf kaum 3 Prozent des gegenwärtigen Emissionsniveaus.

Für eine jede wirksame Strategie zur Verminderung der CO<sub>2</sub>-Emissionen muß ein solches Ergebnis unbefriedigend bleiben, zumal die erneuerbaren Energiequellen zumindest aus technischer, aber teilweise auch aus wirtschaftlicher Sicht einen wesentlich höheren Reduktionsbeitrag leisten könnten. Durch Energieabgaben angehobene Energiepreise und zusätzliche finanzielle Förderung sollte es bei einer gezielten Reduktionsstrategie möglich sein, ihn bis 2005 auf mindestens 5 Prozent der heutigen Emissionen und bis Mitte des kommenden Jahrhunderts bis nahe an das aus heutiger Sicht definierte technische Potential zu steigern.

### 3.6 Maßnahmen

Wie gezeigt worden ist, reagiert das wirtschaftliche Potential der erneuerbaren Energiequellen spürbar auf die jeweils getroffenen Preisannahmen. Daher dürften preispolitische Maßnahmen ein besonders wirksames Instrument zur Förderung ihres verstärkten Einsatzes sein.

Unabhängig von einem noch umfangreichen Untersuchungsbedarf im Hinblick auf die künftigen Einsatzchancen erneuerbarer Energiequellen sowie über die weiter zu intensivierenden F&E-Aktivitäten hinaus sind schon heute zahlreiche energiepolitische Maßnahmen zur Förderung der erneuerbaren Energiequellen und ihrer forcierten Markteinführung möglich und zu empfehlen (darunter fallen die meisten Maßnahmen, die auch für die rationelle Energienutzung und die Kraft-Wärme-Kopplung genannt werden; vgl. Kapitel 5, Tab.6).

Derartige Maßnahmen sollten sich an den Elementen eines Langfristprogrammes orientieren, das sowohl für den Forschungs- und Entwicklungsbereich als auch für den Wirtschaftsbereich klare Zielvorgaben macht. Das erfordert von den politischen Entscheidungsträgern die Überzeugung, daß die erneuerbaren Energiequellen für eine künftig umweltverträglichere Energieversorgung unverzichtbar sind.

Pilot- und Demonstrationsvorhaben bereiten auf der Forschungsseite die verbreitete Einführung erneuerbarer Energietechniken vor, wie dies finanzielle, steuerliche und abgabenmäßige Anreize auf der wirtschaftlichen Seite tun. Dabei ist auf eine enge Verzahnung in bezug auf die unterschiedlichen Zeithorizonte einer Markteinführung zu achten. Folgende Pilot- und Demonstrationsprogramme scheinen kurzfristig realisierbar:

- Nachweis der technischen und wirtschaftlichen Durchführbarkeit solarer Nahwärmeversorgungssysteme in einem größeren Demonstrationsvorhaben mit Hilfe von Long-Ground-Based-Kollektoren (LGB),
- Erprobung von Windenergiekonvertern unterschiedlicher Konzeption im Megawatt-Leistungsbereich,
- Aufbau einer Pilotanlage zur fortgeschrittenen Fertigung von Solarzellen (zum Beispiel Stapelzellen, Folienzellen),

- Aufbau einer Produktionsanlage für billigeres Halbleitermaterial (zum Beispiel solargrade Silicium),
- 200 MW-Demonstrationsprogramm Windenergie sowie ein 100 MW-Demonstrationsprogramm Photovoltaik, um die Netzspeicherkapazität und Problemlösungen zum Beispiel für die phasenstabilisierte Einkopplung von Strom aus dezentralen Anlagen zu untersuchen,
- Demonstrationsprogramm Anwendung von Techniken zur Nutzung von erneuerbaren Energiequellen in Gebäuden der öffentlichen Hand,
- Demonstrationsprogramm der Anwendbarkeit von Techniken zur Nutzung erneuerbarer Energiequellen in Entwicklungsländern und für den Export.

Angesichts ihrer unter heutigen und absehbaren Bedingungen meist noch fehlenden Konkurrenzfähigkeit läßt sich ein für die nachhaltige Reduzierung der CO<sub>2</sub>-Emissionen notwendiger schnellerer und breiterer Einsatz erneuerbarer Energiequellen letztlich nur dann erreichen, wenn es zu einer Veränderung der wirtschaftlichen Rahmenbedingungen kommt. Wie sich aus der Analyse der Wettbewerbsfähigkeit der einzelnen Systeme ergeben hat, stehen neben deren noch zu hohen Kosten vor allem die niedrigen Energiepreise ihrer umfassenden Nutzung entgegen. Vor diesem Hintergrund erscheinen Energie- oder Emissionsabgaben sowie eine direkte oder indirekte finanzielle Förderung erneuerbarer Energiequellen unabdingbar. Auf diesen Gebieten sollten schon kurzfristig Entscheidungen getroffen werden über

- Finanzierungsmodelle (zum Beispiel: langfristige, zinsbegünstigte Kredite),
- Investitionszulagen für Industrie und Private (30 – 50 Prozent),
- Steuervergünstigungen (zum Beispiel wahlweise degressive oder lineare Abschreibung über fünf Jahre),
- Höhe einer allgemeinen Energieabgabe und/oder spezieller Emissionsabgaben, die sich weitestmöglich an den externen Kosten orientieren.

So sehr die genannten Maßnahmen für einen verstärkten Einsatz erneuerbarer Energiequellen erforderlich sind, so sehr kommt es aber auch bei allen potentiellen privaten, gewerblichen und öffentlichen Investoren darauf an, das Bewußtsein für die Notwendigkeit auch individueller Beiträge für eine umweltverträgliche Energieversorgung zu wecken. Hierzu gehören in jedem Fall geeignete Aus- und Weiterbildungsprogramme u. a. für Handwerk und Architekten sowie generell verbesserte Informations- und Beratungsaktivitäten, die insbesondere auf die unter diesem Aspekt hervorragende Bedeutung der erneuerbaren Energiequellen abzustellen sind und Auskunft über die praktischen Nutzungsmöglichkeiten geben sollten.

Verbesserte Informations- und Beratungsaktivitäten können auch dazu beitragen, daß die zahlreichen Hemmnisse, die nach den dazu vorliegenden Einzelstudien einer verstärkten Nutzung auch der erneuer-

baren Energiequellen entgegenstehen, zumindest teilweise überwunden werden. Hinzu kommen müssen aber auch Maßnahmen der direkten Hemmnisbeseitigung im rechtlichen, institutionellen und planungstechnischen Bereich.

Die auf mittlere Sicht vermutlich nur begrenzten Beiträge der erneuerbaren Energiequellen zur Energieversorgung und zur Emissionsreduktion klimarelevanter Spurengase dürfen nicht den Blick für die langfristigen Perspektiven verstellen. Für politische Entscheidungsträger ist die Erkenntnis wichtig, daß diese vermutlich aber nur dann realisiert werden können, wenn auch schon kurz- und mittelfristig die erneuerbaren Energiequellen nach Kräften gefördert werden.

**4. Emissionsminderung durch Austausch fossiler Energieträger untereinander<sup>1)</sup>**

*(Studienkomplex A 3)*

Bezogen auf denselben Energieinhalt verhalten sich die spezifischen CO<sub>2</sub>-Emissionen bei der Verbrennung von Braunkohle, Steinkohle, schwerem Heizöl, leichtem Heizöl/Diesel, Benzin und Erdgas wie 120:100:84:78:76:59 wegen des unterschiedlichen H/C-Verhältnisses der fossilen Brennstoffe. Die Angaben zeigen, daß die Möglichkeit besteht, durch eine Substitution unter den fossilen Energieträgern die Gesamtemission an CO<sub>2</sub> zu verändern. Aus den spezifischen CO<sub>2</sub>-Emissionen läßt sich eine Rangfolge der Wirksamkeit der Substitution ableiten, die lautet Braunkohle – Steinkohle – Mineralöle – Erdgas.

Im weiteren werden die technisch-wirtschaftlichen Möglichkeiten der Minderung energiebedingter klimarelevanter Spurengase, insbesondere von CO<sub>2</sub>, durch eine Substitution zwischen den fossilen Energieträgern für die Bundesrepublik Deutschland (ohne ehemalige DDR) für verschiedene Zeitpunkte (1987, 2005, 2050) aufgezeigt. Dabei wird auch dargestellt, inwieweit eine verstärkte Nutzung kohlenstoffarmer fossiler Energieträger in den nächsten Dekaden einen Zeitgewinn für die Realisierung einer klimaverträglichen Energieversorgung ermöglicht. Die Minderungspotentiale klimarelevanter Spurengase sind dabei vor dem Hintergrund der langfristigen Verfügbarkeit von Mineralöl, Erdgas und Kohle zu beurteilen. Ein Vergleich der spezifischen Emissionsfaktoren der fossilen Brennstoffe für andere Spurengase zeigt, daß mit einer CO<sub>2</sub>-mindernden Substitution fossiler Brennstoffe untereinander in der Regel auch eine Minderung der Emission von Kohlenmonoxid (CO), Nichtmethankohlenwasserstoffen (NMVOC), Methan (CH<sub>4</sub>), Stickoxide (NO<sub>x</sub>) und Schwefeldioxid (SO<sub>2</sub>) bewirkt wird.

<sup>1)</sup> Dieser Teil wurde im Rahmen der zusammenfassenden Energiestudie (vgl. 6. Kapitel) von Prof. Dr. Voß federführend bearbeitet.

**4.1 Förderpotentiale und langfristige Verfügbarkeit von Erdöl, Erdgas und Kohle**

Für eine Betrachtung der Verfügbarkeit der fossilen Energieträger über einen Zeithorizont von gut 60 Jahren kommt der Unterscheidung zwischen Reserven (Vorräten) und Ressourcen sowie konventionellen und nicht konventionellen Vorkommen besondere Bedeutung zu. Reserven und Ressourcen sind dynamische Größen, die sich fortwährend aufgrund des technischen und ökonomischen Wandels verändern: verbesserte Explorationstechnologien und -methoden verschieben die bekannten Reserven in Richtung der bisher nur vermuteten Ressourcen beziehungsweise erhöhen deren Umfang. Ebenso wirkt sich der Fortschritt im Bereich der Fördertechnologien positiv auf das Volumen der wirtschaftlich förderbaren Vorkommen aus. Gemeinsam bewirken diese Entwicklungen auch eine Dämpfung der andernfalls kontinuierlich steigenden Kosten der Bereitstellung der Energieträger.

Reserven oder Vorräte umfassen alle fossilen Brennstoffvorkommen, die aufgrund vorliegender geologischer und produktionstechnischer Informationen mit an Sicherheit grenzender Wahrscheinlichkeit aus bekannten Lagerstätten unter gegenwärtigen wirtschaftlichen und technologischen Produktionsbedingungen gewonnen werden können (auch sichere Reserven genannt). Alle übrigen Kategorien bedürfen entweder veränderter wirtschaftlicher Randbedingungen, technischen Fortschritts (verbesserte Explorationsmethoden und -technologien oder neue Produktions- beziehungsweise Bohrverfahren) oder zusätzlicher Exploration, um die heute entweder submarginalen oder noch zu findenden Vorkommen in die Kategorie Reserven überführen zu können. Der hier relevante Begriff der zusätzlichen Ressourcen umfaßt damit noch nicht entdeckte, geologisch aber wahrscheinliche und unter heute absehbaren technologischen Entwicklungen gewinnbare Potentiale.

Tabelle 10 vermittelt einen Überblick über die derzeitige Energieträgerstruktur der Reserven. Für die kürzere Sicht bis zum Jahr 2005 kann die Reservesituation wie folgt gekennzeichnet werden:

1. Faßt man die drei fossilen Energieträger zusammen, so ist in den nächsten 15 Jahren kein Engpaß

Tabelle 10

**Weltweite fossile Energiereserven und zusätzliche Energieressourcen in Exajoule (EJ)**  
(Stand 1989)

	Energiereserven	Energieressourcen
Kohlen . . . . .	16 800–19 900	80 000
Erdöl . . . . .	5 200	2 350 <sup>1)</sup>
Erdgas . . . . .	4 200	4 300 <sup>1)</sup>
<b>Summe . . . . .</b>	<b>26 200–29 300</b>	<b>86 650</b>

<sup>1)</sup> Ressourcen mit einer Erfolgswahrscheinlichkeit von 50 %

zu erkennen: Erdöl, Erdgas und Kohlen stehen in ausreichendem Maße zur Verfügung.

2. Aufgrund der geographischen Verteilung der Erdölvorräte wird die Erdölförderung der OPEC anteilmäßig am Welterdölaufkommen wieder zunehmen. Dies bedeutet eine partielle Substitution des teuren Erdöls aus Gebieten wie der Nordsee oder kleinen Feldern Nordamerikas durch billig förderbares OPEC-Erdöl. Auf die Marktpreise kann sich dies negativ auswirken: Höhere OPEC-Marktanteile lassen Oligopolstrategien zu, die zu realen Preissteigerungen führen können.
3. Erdgas steht in allen Regionen ausreichend zur Verfügung und könnte Erdöl in vielen Energieverbrauchsgebieten ersetzen.
4. Die konventionellen Erdgasvorräte nähern sich nicht wie im Falle des Erdöls einem Reservenplateau (langfristige konstante statische Reichweite), sondern die Reserven werden auch bei zunehmender Förderung zunächst weiter ansteigen.

Bis zum Jahr 2050 würden bei Fortsetzung des gegenwärtigen Verbrauchstrends die heute bekannten Reserven an Erdöl und Erdgas klar erschöpft sein<sup>1)</sup>. Neue Vorkommen müssen gefunden und erschlossen werden, das heißt Ressourcen sind in Reserven zu überführen. Die Schätzungen über die Weltenergie-Ressourcen (und damit über die langfristige Verfügbarkeit) sind deutlich spekulativer als die Angaben zu den heutigen Reserven. Unter der Annahme, daß die aus geologischen Erwägungen vermuteten Erdöl- und Erdgasressourcen mit einer Erfolgswahrscheinlichkeit in Höhe von 50 Prozent gefunden und gefördert werden können (50 Prozent ist im historischen Vergleich ein konservativer Wert), ergibt sich die in Tabelle 10 dargestellte Größenordnung der Ressourcenschätzungen.

Die zusätzlichen exploratorischen Möglichkeiten bei Erdgas liegen dabei selbst in gut explorierten Gebie-

<sup>1)</sup> Aus Gründen der Klimaschutzpolitik dürfen diese Reserven allerdings nicht aufgebraucht werden, da dies Emissionen klimarelevanter Spurengase in einer Höhe zur Folge hätte, die über den tolerablen Niveau lägen. Gleichzeitig ist zu erwarten, daß eine wirksame Klimaschutzpolitik die Welt-nachfrage nach dem kohlenstoffärmeren Energieträger „Erdgas“ erhöhen wird.

ten weit über denen des Erdöls: Während die bislang geographisch einseitige Konzentration der Explorations-tätigkeiten auf Nordamerika für beide Kohlenwasserstoffe gleichermaßen zusätzliche Ressourcenpotentiale eröffnet, kommen bei Erdgas noch weitere Faktoren zum Tragen:

- Die sich mit der Tiefe der Erdkruste verändernden geothermischen Verhältnisse (Druck und Temperatur) lassen Erdölvorkommen nur bis zu einer Tiefe von ca. 3000 bis 4000 m zu. Erdgas hingegen ist thermisch stabiler, und ist somit nicht an die geothermischen Grenzen des Öfensters gebunden.
- Erdgas ist im Gegensatz zu Erdöl komprimierbar und kann deshalb in dichten geologischen Formationen auftreten, in denen Erdöl nicht vorkommt. Heute steht in den meisten Ländern immer noch die Erdölexploration an erster Stelle. Dies ist aufgrund gegebener Verbrauchsstrukturen und der Vielseitigkeit des Erdöls und dessen leichter Transportierbarkeit nicht verwunderlich. Nachteilig für das Auffinden neuer Erdgasvorkommen ist bisher die Tatsache, daß die Explorationsmethoden und -technologien für die geologischen Voraussetzungen erfolgreicher Erdölfunde ausgelegt sind.
- Eine verstärkte Orientierung der in den letzten Jahren neuentwickelten Explorationsmethoden hin zu geologischen Formationen und in Tiefenbereiche, in denen sich Erdgaslagerstätten entwickelt haben können, wird die Gasreserven mit an Sicherheit grenzender Wahrscheinlichkeit deutlich ausweiten.

In der Bundesrepublik Deutschland (ohne ehemalige DDR) verteilen sich die flüssigen und gasförmigen Kohlenwasserstoffvorkommen auf drei Gebiete: Das Nordwestdeutsche Becken, den Oberrheingraben und das Molassebecken nördlich der Alpen, wobei die Vorkommen des Nordwestdeutschen Beckens die der anderen Gebiete größenordnungsmäßig übertreffen (vgl. Tab. 11).

Der gesamte Lagerstätteninhalt der bisher in der Bundesrepublik Deutschland (ohne ehemalige DDR) aufgefundenen Gasfelder beläuft sich auf ungefähr 29,4 EJ. Der gewinnbare Anteil daran beträgt im Durchschnitt 76 Prozent, das heißt rund 22,4 EJ. Von dieser

Tabelle 11

### Erdöl- und Erdgasreserven in der Bundesrepublik Deutschland (ohne ehemalige DDR)

(Stand 1989)

Kohlenwasserstoffhöffigkeitsgebiete	Erdöl		Erdgas	
	Mtoe	EJ	Gm <sup>3</sup>	EJ
Nordwestdeutsches Becken . . . . .	56,571	2,367	269,406	10,036
Oberrheingraben . . . . .	1,748	0,073	n. a.	n. a.
Molassebecken . . . . .	2,181	0,091	2,892	0,108
Vorräte insgesamt . . . . .	60,500	2,531	272,298	10,144

gewinnbaren Gasmenge wurden bis heute 12,3 EJ gefördert, womit sich ein für die Zukunft zur Verfügung stehender sicherer gewinnbarer Erdgasvorrat von 10,1 EJ ergibt. Knapp 50 Prozent des verbleibenden Erdgasvorrats enthält Schwefelwasserstoffe, wodurch wegen des extrem toxischen und korrosiven Verhaltens besondere Anforderungen an die Förderung und Aufbereitung gestellt werden.

Weitere Erdgasfunde werden auch in der Bundesrepublik Deutschland mit Sicherheit gemacht werden, zumal die Erdgasexplorationsaktivitäten im Gegensatz zum Erdöl in der Bundesrepublik Deutschland stetig weitergeführt werden. Auch für die Bundesrepublik Deutschland sind langfristig verbesserte Explorationsmethoden und ein Trend zu Tiefen jenseits des Ölfensters zu erwarten. Die zukünftigen Gasneufunde allein in Norddeutschland werden auf 9,3 bis 13 EJ geschätzt, wobei sich diese Schätzungen vor allem auf Analysen bereits gut explorierter Gebiete und geologischer Formationen stützen. Weitere Neufunde werden in Schleswig-Holstein, in der Nordsee, im Oberrheingraben und im Alpenvorland erwartet. Spekulativ ist hierbei mit einer Größenordnung von mindestens 3,7 bis 7,5 EJ an zusätzlichen Erdgasvorkommen zu rechnen.

Es ergibt sich somit folgende Erdgasressourcensituation für die Bundesrepublik Deutschland (ohne ehemalige DDR): Der Erdgasproduktion von 630 PJ des Jahres 1988 stehen rund 10 EJ an sicheren Vorräten gegenüber. Neue Erdgasfunde werden auf 13 bis 20,5 EJ förderbare Vorräte geschätzt. Die Produktionskosten der bekannten Gasvorräte werden mittelfristig im Kostenbereich von 2 bis 5 DM(87)/GJ liegen. Für neu zu entdeckende Erdgasvorkommen könnten die Kosten nicht zuletzt wegen der noch wenig bekannten Kosten des Tiefbohrns auf rund 9 DM(87)/GJ steigen.

Für das Jahr 2005 erscheint eine Erdgasproduktion von rund 0,6 EJ bei Produktionskosten von 7 bis 8 DM(87)/GJ realistisch. Damit wären die bekannten Erdgasreserven der Bundesrepublik Deutschland (ohne ehemalige DDR) bis 2005 erschöpft. Da bis dahin ein Teil der noch aufzufindenden Erdgasressourcen zur Verfügung stehen wird, kann zwar von einer weiter anhaltenden heimischen Erdgasproduktion für die Zeit nach dem Jahr 2005 ausgegangen werden. Das Produktionsniveau wird jedoch bei steigenden Produktionskosten rückläufig sein. Für das Jahr 2050 wird ein Erdgasproduktionsvolumen von etwa 0,2 EJ (bei Produktionskosten von 9 DM(87)/GJ) angesetzt.

Die Verfügbarkeit von Primärenergien im nationalen Rahmen bestimmt sich aus den Möglichkeiten

- heimische Energiequellen zu erschließen,
- über Importe Anteile an den weltweiten Energiepotentialen zu nutzen.

Die Bundesrepublik Deutschland (ohne ehemalige DDR) muß derzeit rund 62 Prozent ihres (fossilen) Energiebedarfs importieren. Die Energieträgerstruktur ist hierbei äußerst unausgewogen: Bei der Steinkohle beträgt die Importquote nur 9 Prozent, bei den Gasen 37 Prozent, bei den Mineralölerzeugnissen aber über 95 Prozent.

Auch Erdgas wird in der Zukunft vermehrt importiert werden müssen. Die Erdgasreserven und -ressourcen sind weltweit im Vergleich zum Erdöl deutlich größer, so daß es möglich sein sollte, im Zuge einer wachsenden Weltproduktion die Importe zu steigern. Bei langfristig stärker steigenden Ölpreisen und damit tendenziell auch höheren Erdgaspreisen werden Anreize geschaffen, bei Förderung und Transport in Kapazitätsausweitungen zu investieren. Technisch ist hier ein Gasimportvolumen von 6 EJ/a bei optimaler und zeitgerechter Investitionsplanung und Vertragsgestaltung machbar<sup>2)</sup>. Die Exportregionen wären in diesem Fall vor allem die Sowjetunion, Nordafrika und der Nahe Osten. Diese Versorgungsstruktur würde selbstverständlich eine geopolitische und versorgungsstrategische Absicherung erfordern. Eine weltweit steigende Erdgasnachfrage, gegebenenfalls verstärkt durch Maßnahmen zur CO<sub>2</sub>-Minderung, birgt allerdings die Möglichkeit von über den Gewinnungskostenanstieg hinausgehenden Preissteigerungen.

#### 4.2 Mögliche Beiträge des Austausches fossiler Energieträger untereinander zur Minderung klimarelevanter Spurengasemissionen in der Bundesrepublik Deutschland (ohne ehemalige DDR)

Die in Kapitel 3 Nr.2 diskutierten, die Methanemissionen berücksichtigenden äquivalenten spezifischen CO<sub>2</sub>-Emissionen der verschiedenen fossilen Energieträger zeigen, daß die Unsicherheiten bezüglich des spezifischen Treibhauspotentials des Methans für die Bewertung von Treibhausgasminderungsmaßnahmen, die kohlenstoffreiche Brennstoffe (Stein- und Braunkohle) durch kohlenstoffärmere Brennstoffe (Mineralölprodukte und Erdgas) ersetzen, nur von untergeordneter Bedeutung sind. Aus diesem Grund werden, wegen der bestehenden Unsicherheit über das anzusetzende spezifische Treibhauspotential des Methans, die Betrachtungen auf die CO<sub>2</sub>-Emissionen beschränkt. Gemäß der Strukturierung der Energieversorgungs- und -verbrauchsbereiche in der Bundesrepublik Deutschland (ohne ehemalige DDR) werden die Potentiale der CO<sub>2</sub>-Minderung durch die Substitution fossiler Energieträger untereinander getrennt nach den Sektoren Stromerzeugung, Fernwärmeerzeugung, Haushaltssektor, Kleinverbrauchssektor, Industriesektor und Verkehrssektor betrachtet. In jedem einzelnen Sektor wird weiter nach Verwendungszwecken unterschieden. Des weiteren werden die CO<sub>2</sub>-Minderungsmöglichkeiten der verschiedenen Austauschmöglichkeiten der fossilen Energieträger untereinander für drei unterschiedliche Zeitpunkte soweit möglich quantitativ ermittelt und die Kosten der CO<sub>2</sub>-Vermeidung durch die Substitution fossiler Energieträger untereinander abgeschätzt. Untersucht werden einmal die Minderungsmöglichkeiten, die sofort wirksam werden könnten. Weiterhin werden die CO<sub>2</sub>-Minderungspotentiale für die nahe Zukunft, mit dem Bezugsjahr 2005, und für die ferne Zukunft, mit dem Bezugsjahr 2050, betrachtet. Bei der Ermittlung des Aufwands der CO<sub>2</sub>-Minderung durch

<sup>2)</sup> Vgl. Studie A.1.3.1 des Studienprogramms der Enquete-Kommission, S. 72

einen verstärkten Einsatz C-arter fossiler Energieträger ergeben sich in einzelnen Fällen auch negative spezifische CO<sub>2</sub>-Minderungskosten. Diese bedeuten, daß, im Rahmen der getroffenen Annahmen, diese Maßnahmen auch ohne Bewertung ihrer CO<sub>2</sub>-Minderung ökonomisch sinnvoll wären, da sie den Aufwand für die Bereitstellung der jeweiligen Energieform reduzieren.

#### 4.2.1 Sofortmaßnahmen

Ein unmittelbar wirksam werdender Beitrag zur CO<sub>2</sub>-Minderung (Sofortmaßnahme) läßt sich im Rahmen des bestehenden Anlagenparks durch einen verstärkten Einsatz CO<sub>2</sub>-ärmerer fossiler Energieträger in Mischfeuerungsanlagen sowie durch eine erhöhte Auslastung von gas- beziehungsweise heizölgefeuerten Kraftwerken zur Substitution von Strom aus Kohlekraftwerken erreichen. Bei Ausschöpfung der gegenwärtig diesbezüglich bestehenden technischen Möglichkeiten ließen sich die energiebedingten CO<sub>2</sub>-Emissionen in der Bundesrepublik Deutschland (ohne ehemalige DDR) um rund 53 Millionen Tonnen CO<sub>2</sub>/a reduzieren. Den größten Beitrag erbringt hierbei mit 44,7 Millionen Tonnen CO<sub>2</sub>/a die Substitution der Stromerzeugung in Braunkohlekraftwerken durch eine verstärkte Auslastung von bestehenden Gaskraftwerken. Des weiteren könnten durch eine verstärkte Nutzung von CO<sub>2</sub>-armen fossilen Energieträgern in Mischfeuerungen bei der Stromerzeugung, bei der Fernwärmeerzeugung und im Industriesektor CO<sub>2</sub>-Minderungen in Höhe von 8,1 Millionen Tonnen CO<sub>2</sub>/a erreicht werden. Die durch diese Sofortmaßnahmen erreichbare Minderung der CO<sub>2</sub>-Emissionen entspricht rund 7,5 Prozent der Emissionen des Jahres 1987. Gleichzeitig würden auch die NO<sub>x</sub>-Emissionen um 128 Kilotonnen (4,9 Prozent der Gesamtemissionen des Jahres 1987), die NMVOC-Emissionen um 1 Kilotonne (0,1 Prozent) sowie die CH<sub>4</sub>-Emissionen (einschließlich der vorgelagerten Stufen) um 36 Kilotonnen (1,4 Prozent) gemindert werden. Bei den Mischfeuerungen ergibt sich eine Bandbreite der Effizienzen in Höhe von -276 bis +187 DM je Tonnen CO<sub>2</sub>. Es zeigt sich, daß für die heimische Steinkohle das gesamte technische Potential mit negativen spezifischen Minderungskosten verbunden ist, dagegen sind die spezifischen Minderungskosten bei der Importkohle immer positiv. Bei der zweiten Möglichkeit, sofort eine Reduzierung der CO<sub>2</sub>-Emissionen zu erzielen, der verstärkten Auslastung von bestehenden Öl- und Erdgaskraftwerken und einer entsprechenden Reduktion bei der Stromerzeugung in Braunkohlebeziehungsweise in Steinkohlekraftwerken, ergeben sich Effizienzen im Bereich von -76 bis +212 DM je Tonnen CO<sub>2</sub>, wobei die negativen Werte aus der Betrachtung der heimischen Steinkohle resultieren. Den Maßnahmen bezüglich der heimischen Steinkohle steht jedoch als wesentliche Restriktion der Jahrhundertvertrag zur Verstromung der deutschen Steinkohle entgegen.

Die rechnerisch bei einer Substitution heimischer Steinkohle eingesparten Kosten sind aber nicht unbedingt der CO<sub>2</sub>-Minderungsmaßnahme zuzurechnen. Sie, aber nicht die CO<sub>2</sub>-Emissionen, könnten auch durch einen Ersatz von heimischer Steinkohle durch Importkohle vermieden werden. Bei der Bewertung

der rechnerisch ermittelten Effizienzen einer Substitution heimischer Steinkohle sind die energiepolitischen Kostenbestandteile zur Erhöhung der Versorgungssicherheit und Sicherung des heimischen Bergbaus jeweils mit zu beachten.

Läßt man diese Besonderheit bei der heimischen Steinkohle außen vor, so sind alle durch Sofortmaßnahmen erzielbaren CO<sub>2</sub>-Minderungen mit einem zusätzlichen Aufwand (Kosten) verbunden. Bei den gegenwärtigen Preisrelationen der fossilen Energieträger weist die höhere Auslastung von Erdgaskraftwerken zu Lasten der Stromerzeugung in Braunkohlekraftwerken die relativ niedrigsten spezifischen Minderungskosten auf, bei einem größeren Minderungspotential. Für die praktische Umsetzung der oben diskutierten Maßnahmen ist insbesondere noch die Verfügbarkeit zusätzlicher Erdgasmengen zu klären, da eine volle Ausschöpfung des technischen Potentials einen Gasmehrverbrauch von ca. 760 PJ beziehungsweise eine Erhöhung des Primärenergieverbrauchs an Gas in der Bundesrepublik Deutschland (ohne ehemalige DDR) um 39 Prozent mit sich bringen würde. Obwohl von Seiten des Transport- und Leitungsnetzes noch gewisse Möglichkeiten bestehen, ist eine sofortige volle Ausschöpfung der Potentiale nicht möglich. Des weiteren ist zu berücksichtigen, daß eine kurzfristig verstärkte Gasnachfrage gegebenenfalls nur zu höheren Bezugspreisen zu verwirklichen wäre, wodurch sich die spezifischen Minderungskosten dieser Sofortmaßnahmen weiter erhöhen würden.

#### 4.2.2 Maßnahmen in der nahen Zukunft

Um die Möglichkeiten der Substitution fossiler Energieträger untereinander hinsichtlich ihrer Potentiale zur Minderung der klimarelevanten Spurengase vergleichen und bewerten zu können, ist für die Maßnahmen der nahen Zukunft die Vorgabe einer Bezugsbasis notwendig, die die Entwicklung der Energieträgernachfrage und ihre Deckung unter Status-quo-Bedingungen, das heißt insbesondere ohne Maßnahmen zur Reduktion klimarelevanter Spurengase, beschreibt. Entsprechend den Vorgaben des „Gemeinsamen Analyserasters“ wurde als Referenzentwicklung zur Quantifizierung der CO<sub>2</sub>-Minderungspotentiale das Szenario von Prognos aus dem Jahr 1987 herangezogen. Die anhand dieser Bezugsbasis quantifizierten Potentialwerte sind nicht als exakte Angaben der erreichbaren Minderungen oder gar als Prognose der tatsächlichen CO<sub>2</sub>-Reduktionen zu verstehen, sondern sie sollen nur eine quantitative Vorstellung der erzielbaren CO<sub>2</sub>-Minderungen durch den Austausch fossiler Energieträger untereinander vermitteln. Andere Referenzentwicklungen würden zu anderen Zahlenwerten der Potentiale führen, ihre Größenordnung aber nicht verändern.

Im folgenden werden zunächst die technischen CO<sub>2</sub>-Minderungspotentiale angegeben, die sich aus

- der Substitution von Braunkohle durch schweres und leichtes Heizöl,
- der Substitution von Steinkohle durch schweres und leichtes Heizöl sowie
- der Substitution von schwerem Heizöl durch leichtes Heizöl



ergeben. Das technische Potential beschreibt die unter Außerachtlassung ökonomischer Aspekte aus technischer Sicht mögliche CO<sub>2</sub>-Minderung bei einem Ersatz der bestehenden Anlagen nach Erreichen ihrer technischen Lebensdauer. Auf die Minderungspotentiale der Substitution durch Erdgas wird wegen ihrer besonderen Bedeutung danach ausführlicher eingegangen.

Die Minderungspotentiale für die drei oben angeführten Substitutionsmöglichkeiten betragen in der nahen Zukunft (Bezugsjahr 2005) gegenüber dem Referenzfall

- 81,1 Millionen Tonnen CO<sub>2</sub> bei einer verstärkten Nutzung von schwerem Heizöl oder
- 91,1 Millionen Tonnen CO<sub>2</sub> bei einer verstärkten Nutzung von leichtem Heizöl.

Die für das schwere Heizöl und das leichte Heizöl ausgewiesenen technischen Potentiale sind als alternative Potentiale aufzufassen. Da jedoch die beiden Produkte in einer Koppelproduktion erzeugt werden, wäre es notwendig, hier eine Mischstrategie zu finden, in dem etwa das leichte Heizöl im Haushaltssektor und das schwere Heizöl im Industriesektor verstärkt eingesetzt werden würde. Das mengenmäßig größte CO<sub>2</sub>-Minderungspotential läge jedoch mit 96 Prozent beim leichten Heizöl und mit 98 Prozent beim schweren Heizöl in der Stromerzeugung.

Erdgas hat unter den fossilen Energieträgern die niedrigsten spezifischen CO<sub>2</sub>-Emissionen und damit im Prinzip das größte CO<sub>2</sub>-Minderungspotential. Aus diesem Grunde werden die technisch erreichbaren CO<sub>2</sub>-Minderungen durch eine verstärkte Erdgasnutzung im folgenden ausführlicher diskutiert.

Begrenzt man den Ausbau der Gaskraftwerke in der Stromerzeugung auf den zukünftigen Ersatz- und Erweiterungsbedarf der fossilen Kraftwerksleistung, so wäre eine Minderung der CO<sub>2</sub>-Emissionen der Stromerzeugung von rund 107 Millionen Tonnen CO<sub>2</sub>/a im Jahr 2005 technisch möglich. Der Anteil der Stromerzeugung aus Gaskraftwerken an der gesamten Stromerzeugung würde in diesem Fall auf 30 Prozent ansteigen und die CO<sub>2</sub>-Emissionen der Stromerzeugung würden um 46 Prozent sinken. Gleichzeitig würden auch die NO<sub>x</sub>-Emissionen um 89 Kilotonnen und die CH<sub>4</sub>-Emissionen (einschließlich der vorgelagerten Stufen) um 353 Kilotonnen gemindert werden. Eine Veränderung der Emissionssituation bei den NMVOC würde nicht stattfinden. Unter der Annahme, daß die neu zu bauenden Kraftwerke die gleichen Auslastungen aufweisen wie die zu ersetzenden Anlagen des Referenzfalles, so ergibt sich eine Bandbreite der spezifischen Minderungskosten in Höhe von –89 bis +23 DM/t CO<sub>2</sub>. Dabei ergeben sich die negativen spezifischen Minderungskosten bei einer Betrachtung der heimischen Steinkohle. Gegenüber der Braunkohle und der Importkohle ist der verstärkte Gaseinsatz mit einem höheren (volks)wirtschaftlichen Aufwand verbunden.

Bei einer Umstellung der Fernwärmeerzeugung auf Erdgas, die entsprechend der Altersstruktur der bestehenden Anlagen über die zukünftig zuzubauenden Heizkraftwerks- und Heizwerkskapazitäten nicht hinausgeht, resultiert eine erreichbare CO<sub>2</sub>-Minderung

von 2,9 Millionen Tonnen CO<sub>2</sub>/a. In Gasheizkraftwerken und -heizwerken würden dann 28 Prozent der gesamten Fernwärme erzeugt. Gleichzeitig würden auch die NO<sub>x</sub>-Emissionen um 4 Kilotonnen, die NMVOC-Emissionen um 0,2 Kilotonnen sowie die CH<sub>4</sub>-Emissionen (einschließlich der vorgelagerten Stufen) um 19 Kilotonnen gemindert werden. Es zeigt sich, daß in der Fernwärmeversorgung der verstärkte Gaseinsatz nur bei der Substitution von schwerem Heizöl in Heizwerken sowie bei der Substitution von Braunkohle in Heizkraftwerken mit positiven spezifischen Minderungskosten verbunden ist. In der Fernwärmeerzeugung weist insbesondere der Ersatz von Steinkohle (sowohl heimisch als auch importiert) in Heizwerken und in Heizkraftwerken sowie von Mineralölprodukten in Heizkraftwerken eine hohe Effizienz auf, wobei dies auf die im Vergleich günstigen Anlagekosten der Gasheizkraftwerke und -heizwerke zurückzuführen ist. Insgesamt könnten in der Fernwärmeerzeugung bei einem verstärkten Gaseinsatz 2,3 Millionen Tonnen CO<sub>2</sub> mit negativen spezifischen Minderungskosten gemindert werden.

Die Substitution von festen und flüssigen Brennstoffen zur Raumwärme- und Warmwasserversorgung der privaten Haushalte durch Erdgas ist in der Praxis durch die sich aus der Siedlungsstruktur ergebenden Anschlußmöglichkeiten an das Gasverteilungsnetz begrenzt. Geht man aufgrund der Verteilung der Größenklassen der Gemeinden von einer möglichen Anschlußquote von 77,5 Prozent der Haushalte aus, so errechnet sich das technische CO<sub>2</sub>-Minderungspotential eines verstärkten Erdgaseinsatzes zu 14 Millionen Tonnen CO<sub>2</sub>/a. Eine Ausschöpfung dieses technischen Potentials hätte zur Folge, daß 70 Prozent der Haushalte ihren Raumwärme- und Warmwasserbedarf durch den Energieträger Erdgas decken würden. Gleichzeitig würden auch die NO<sub>x</sub>-Emissionen um 10 Kilotonnen und die NMKW-Emissionen um 5 Kilotonnen gemindert werden. Dagegen würde durch diese Maßnahmen eine Erhöhung der CH<sub>4</sub>-Emissionen (einschließlich der vorgelagerten Stufen) um 14 Kilotonnen impliziert. Es ergibt sich eine Bandbreite der spezifischen Minderungskosten zwischen –270 und +450 DM/t CO<sub>2</sub>. Insgesamt kann im Haushaltssektor durch die Substitution von leichtem Heizöl durch Gas eine Minderung der CO<sub>2</sub>-Emissionen um 11,3 Millionen Tonnen CO<sub>2</sub> mit negativen spezifischen Minderungskosten erreicht werden. Die größten Potentiale bietet die Substitution von ölgefeuerten Zentralheizungen durch moderne gasgefeuerten Brennwertkessel.

Das technische Potential zur Minderung von CO<sub>2</sub>-Emissionen im Kleinverbrauchssektor ergibt sich durch die Substitution von Mineralölprodukten durch Erdgas sowie den Ersatz von Gas-Einzel-Anlagen durch effizientere Gaszentralheizungsanlagen. Es beträgt im Jahr 2005 rund 4,8 Millionen Tonnen CO<sub>2</sub>/a, wobei in diesem Fall fast 60 Prozent der Wärmeversorgung des Kleinverbrauchssektors durch Erdgas erfolgen würde. Gleichzeitig würden auch die NO<sub>2</sub>-Emissionen um 6 Kilotonnen und die NMVOC-Emissionen um 0,2 Kilotonnen gemindert werden. Dagegen würden die CH<sub>4</sub>-Emissionen (einschließlich der vorgelagerten Stufen) um 12 Kilotonnen ansteigen. Im Kleinverbrauchssektor weisen insbesondere die Maß-

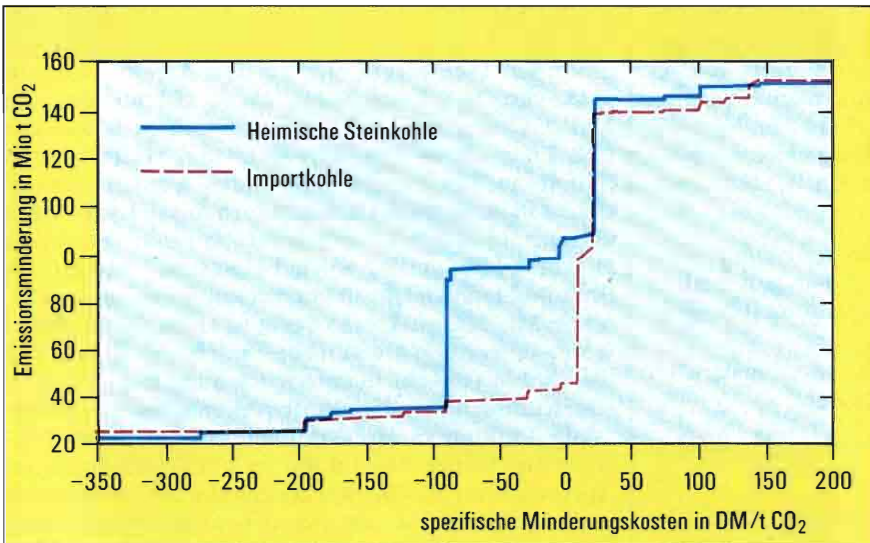


Abb. 11: Kosten-Potential für einen verstärkten Gaseinsatz in der Bundesrepublik Deutschland (ohne ehemalige DDR) im Jahr 2005 (wenn Steinkohle substituiert wird, gerechnet gegen die Preise von heimischer Steinkohle beziehungsweise von Importkohle)

nahmen der Substitution von leichtem Heizöl in Sammelheizungen bei kleinen Wärmeleistungen und die Substitution von Einzelanlagen bei grösseren Wärmeleistungen eine hohe Effizienz auf. Für diese beiden Teilkomplexe kann in der nahen Zukunft auch eine starke Umsetzung beim Kleinverbrauchssektor erwartet werden. In Summe werden im Kleinverbrauchssektor die CO<sub>2</sub>-Emissionen um 1,9 Millionen Tonnen CO<sub>2</sub> vermindert, wenn alle Maßnahmen mit negativen spezifischen Minderungskosten durchgeführt werden.

Im Industriesektor ergibt sich im Rahmen der Wärmebeziehungsweise Prozeßwärmeerzeugung ein technisches CO<sub>2</sub>-Minderungspotential in Höhe von 20 Millionen Tonnen CO<sub>2</sub>/a durch eine verstärkte Nutzung von Gas. Gleichzeitig würden auch die NO<sub>x</sub>-Emissionen um 39 Kilotonnen, die NMVOC-Emissionen um 1,5 Kilotonnen sowie die CH<sub>4</sub>-Emissionen (einschließlich der vorgelagerten Stufen) um 78 Kilotonnen gemindert werden. Eine sehr hohe Effizienz weist generell der Ersatz von leichtem Heizöl und von heimischer Steinkohle durch Gas auf. Ebenso erscheint eine Substitution von schwerem Heizöl in Heizkraftwerken der mittleren Leistungsklassen (10 bis 200 MWth Wärmeleistung) aufgrund der dabei resultierenden negativen spezifischen Minderungskosten von rund 70 DM/t CO<sub>2</sub> eine empfehlenswerte Maßnahme zu sein. Demgegenüber ergeben sich für den Ersatz von Braunkohle (mit Ausnahme von Heizkraftwerken mit 10 bis 50 MWth Wärmeleistung) und von schwerem Heizöl in größeren Heizkraftwerken sowie in Heizkraftwerken durch Gas positive spezifische Minderungskosten zwischen +50 und +2685 DM je Tonne CO<sub>2</sub>. Auch bei der Betrachtung der Importkohle ist der überwiegende Teil der Maßnahmen und auch das größere Minderungspotential im Industriesektor mit einem höheren volkswirtschaftlichen Aufwand verbunden. Insgesamt könnten bei Betrachtung der Importkohle rund 5,6 Millionen Tonnen CO<sub>2</sub>/a und bei

der Zugrundelegung der heimischen Steinkohle etwa 15,3 Millionen Tonnen CO<sub>2</sub>/a mit negativen spezifischen Minderungskosten vermindert werden.

Im Verkehrssektor sind die aus heutiger Sicht in naher Zukunft möglichen Substitutionen von Diesel- beziehungsweise Ottokraftstoff durch Gas sehr begrenzt. Mit Flüssiggas betriebene PKW weisen etwa um 14 Prozent geringere, auf die Fahrleistung bezogene CO<sub>2</sub>-Emissionen als Diesel- beziehungsweise Benzinfahrzeuge auf. Unterstellt man, daß Flüssiggas-PKW im Jahr 2005 einen Anteil von 20 Prozent der Fahrleistung erbringen können, so würde das eine Minderung der CO<sub>2</sub>-Emissionen des Verkehrssektors um rund 2 Millionen Tonnen CO<sub>2</sub>/a bedeuten.

Insgesamt ergibt sich, daß, wenn man die Substitution durch Erdgas auf den im Rahmen des Ersatz- beziehungsweise Erweiterungsbedarfs notwendigen Zubau neuer Kessel- und Kraftwerksanlagen begrenzt, die technisch mögliche Minderung der CO<sub>2</sub>-Emissionen rund 150 Millionen Tonnen CO<sub>2</sub>/a beträgt. Bezogen auf die CO<sub>2</sub>-Emissionen des Basisjahres 1987 entspricht dies rund 20 Prozent der Emissionen. Diese technisch mögliche CO<sub>2</sub>-Minderung durch Erdgas macht aber auch deutlich, daß die Erreichung weitgehender Minderungen, wie sie von den Klimatologen insbesondere für den Zeitraum nach 2005 als notwendig angesehen werden, auf diesem Weg nicht möglich ist. Die verstärkte Nutzung von Erdgas kann folglich allein keine klimaverträgliche Energieversorgung bewirken. Sie kann aber in einer Übergangsphase zur Minderung der CO<sub>2</sub>-Emissionen beitragen.

Gleichzeitig würden mit den Maßnahmen eines verstärkten Gaseinsatzes auch die NO<sub>x</sub>-Emissionen um 147 Kilotonnen (5,7 Prozent der Gesamtemissionen des Jahres 1987), die NMVOC-Emissionen um 6,5 Kilotonnen (0,4 Prozent) und die CH<sub>4</sub>-Emissionen (einschließlich der vorgelagerten Stufen) um 424 Kilotonnen (16,1 Prozent) gemindert werden.

Die, ausgehend von den zugrunde gelegten Energiepreisen, ermittelten spezifischen CO<sub>2</sub>-Minderungskosten weisen eine große Bandbreite auf. In Abbildung 11 sind die verschiedenen zuvor diskutierten Maßnahmen der Minderung von CO<sub>2</sub>-Emissionen bei einer Substitution von Braunkohle, Steinkohle und Mineralölen durch Gas in Form von Kosten-Potential-Funktionen für eine Bandbreite der spezifischen Minderungskosten von -350 und +200 DM je Tonnen CO<sub>2</sub> dargestellt. Naturgemäß ergeben sich bei einer Substitution heimischer Steinkohle aufgrund ihrer hohen Kosten rechnerisch größere Minderungspotentiale mit negativen spezifischen Minderungskosten. Geht man hingegen von den Preisen für Importkohle aus, so ist der größte Teil des Minderungspotentials (rund 85 Prozent) eines verstärkten Gaseinsatzes mit zusätzlichen Kosten verbunden.

Eine hohe Kosteneffizienz weist ein verstärkter Gaseinsatz dann auf, wenn leichtes Heizöl und Steinkohle in Feuerungsanlagen kleiner Leistung ersetzt werden, wobei die erzielbare CO<sub>2</sub>-Minderung aber begrenzt ist. Große Minderungspotentiale mit relativ geringen zusätzlichen Minderungskosten (< 50 DM/t CO<sub>2</sub>) bestehen vor allem in der Stromerzeugung (Ersatz von Braun- und Steinkohle) und in kleinerem Ausmaß auch in der Industrie.

#### 4.2.3 Kohlendioxid-Minderungspotentiale in ferner Zukunft

Die CO<sub>2</sub>-Minderungsmöglichkeiten durch CO<sub>2</sub>-ärmere fossile Energieträger sind über einen Zeitraum von rund 60 Jahren wohl nur durch die Verfügbarkeit dieser Energieträger (Erdgas und Mineralöl) begrenzt und nicht durch anlagentechnische oder zubauserseitige Restriktionen. Angesichts der ressourcenseitigen Begrenzung von Erdgas kommt diesem CO<sub>2</sub>-armen Energieträger, insbesondere wenn auf lange Sicht drastische Minderungen (im Bereich von 80 – 90 Prozent) der energiebedingten CO<sub>2</sub>-Emissionen notwendig sind, wohl eher die Aufgabe zu, in der Übergangsphase auf eine klimaverträgliche Energieversorgung die mit hohen CO<sub>2</sub>-Emissionen verbundenen fossilen Energieträger schneller zu ersetzen und zu einer beschleunigten Minderung der CO<sub>2</sub>-Emissionen in den nächsten zwei bis drei Jahrzehnten beizutragen. Aus langfristiger Sicht ist gegebenenfalls noch die Frage von Interesse, ob Erdgas im Verkehrssektor, wo sich aus heutiger Sicht die Einführung CO<sub>2</sub>-freier Kraftstoffe gegebenenfalls schwieriger gestaltet als in anderen Bereichen, einen Beitrag zur CO<sub>2</sub>-Reduktion leisten kann.

Erdgas kann als CNG (Compressed Natural Gas) in Straßenfahrzeugen verwendet werden. CNG-Fahrzeuge haben heute einen um 8 Prozent geringeren spezifischen Energieverbrauch als Benzinfahrzeuge. Zusammen mit den günstigeren CO<sub>2</sub>-Emissionen des Methans ergeben sich auf die Fahrleistung bezogene CO<sub>2</sub>-Emissionen der CNG-Fahrzeuge, die um 29 Prozent geringer sind als bei Benzin- und Dieselfahrzeugen. Die damit mögliche Minderung der verkehrsbedingten CO<sub>2</sub>-Emissionen könnte langfristig von Bedeutung sein, wenn die CO<sub>2</sub>-freien Optionen, wie zum Beispiel das Wasserstoff- oder das Elektrofahrzeug, nicht im notwendigen Umfang eingeführt werden können.

#### 4.3 Hemmnisse und offene Fragen

Natürlich stellt sich im Zusammenhang mit der Ausschöpfung der zuvor diskutierten CO<sub>2</sub>-Minderungspotentiale einer Substitution fester und flüssiger fossiler Energieträger durch Gas die Frage nach der Verfügbarkeit der dazu erforderlichen Erdgasmengen. Bei Ausschöpfung des technischen CO<sub>2</sub>-Minderungspotentials würde der Erdgasverbrauch gegenüber der Referenzentwicklung um 115 Prozent auf rund 4,53 EJ/a zunehmen.

In Nr. 4.1 wurde dargelegt, daß bei optimaler und zeitgerechter Investitionsplanung und Vertragsgestaltung aufgrund der Reservensituation ein Gasimportvolumen von jährlich 6 EJ realisierbar wäre. Dies würde bedeuten, daß eine Strategie der CO<sub>2</sub>-Minderung durch eine verstärkte Erdgasnutzung zur Substitution CO<sub>2</sub>-reicher fossiler Energieträger nicht an der Nichtverfügbarkeit von Erdgas scheitern müßte. Erdgas steht in allen Regionen ausreichend zur Verfügung und die konventionellen Erdgasvorräte nähern sich nicht wie im Falle des Erdöls einem Reservenplateau, sondern sie werden auch bei zunehmender Förderung nach gegenwärtiger Einschätzung weiter ansteigen. Die exploratorischen Möglichkeiten liegen beim Erdgas weit über denen des Erdöls. Ein vorrangiges Interesse an verstärkter Explorationstätigkeit besteht gegenwärtig bei der Gasindustrie nicht, zu groß sind die bereits bekannten Vorkommen. Die Versorgungssicherheit ist beim Erdgas eher günstig zu bewerten, denn wenn die Investitionen in eine Gaspipeline erst einmal getätigt sind, dann sind Verkäufer und Käufer für lange Zeit aneinander gebunden, da die Gasflüsse nicht wie beim Erdöl zu anderen Abnehmern umgeleitet werden können. Langfristige Handelsverträge von bis zu 20 Jahren und mehr sind deshalb im Gasgeschäft die Regel. Der notwendige Ausbau der Erdgasinfrastruktur wäre technisch möglich, würde aber erhebliche Anstrengungen erfordern und gegebenenfalls zu höheren Verteilungs- und Speicherkosten führen.

Die zuvor erläuterten spezifischen CO<sub>2</sub>-Minderungskosten werden ganz wesentlich durch die Energieträgerpreisrelation zwischen dem substituierenden und dem substituierten Energieträger bestimmt. Wie bereits erwähnt, ist die Energieträgerpreisentwicklung und damit auch die Entwicklung der Energieträgerpreisrelationen mit erheblichen Unsicherheiten behaftet. Hinzu kommt, daß eine Strategie der CO<sub>2</sub>-Reduktion durch Austausch fossiler Energieträger über die damit verbundenen Nachfrageeffekte (verstärkte Nachfrage nach CO<sub>2</sub>-armen und reduzierte Nachfrage nach CO<sub>2</sub>-reichen fossilen Energieträgern) auf den Weltenergiemärkten zu Preiswirkungen führen kann, die die spezifischen CO<sub>2</sub>-Minderungskosten erhöhen und die Kosteneffizienzen einer fossilen Substitutionsstrategie erheblich verschlechtern können. Ein Nachgeben der Kohlepreise und ein Anziehen der Erdgaspreise wird somit die ausgewiesenen spezifischen CO<sub>2</sub>-Minderungskosten absolut und relativ für die einzelnen Energieträger ändern. Die entsprechenden Elastizitäten der Weltenergiepreise bei solchen markanten Nachfrageverschiebungen sind empirisch derzeit nicht bekannt und nicht erforscht, so daß beim gegenwärtigen Stand der Kenntnisse sich

derartige Preiswirkungen nicht quantifizieren lassen. Dadurch wird die Einordnung und Bewertung von Maßnahmen zur CO<sub>2</sub>-Minderung durch Substitution fossiler Energieträger untereinander erheblich erschwert. Dies macht deutlich, daß die zuvor diskutierten spezifischen CO<sub>2</sub>-Minderungskosten der verschiedenen Substitutionsmaßnahmen nur eine erste orientierende Hilfe sein können.

Die hier aufgezeigten CO<sub>2</sub>-Minderungsmöglichkeiten eines Austausches fossiler Energieträger untereinander stehen gegebenenfalls in Konkurrenz mit anderen CO<sub>2</sub>-Minderungsmöglichkeiten zum Beispiel durch Maßnahmen zur Energieeinsparung oder einer verstärkten Nutzung von Kernenergie. Ob und wie sie davon tangiert werden, läßt sich nur im Rahmen einer weitergehenden, gesamtsystemaren Untersuchung klären. Weitere Hemmnisse, die einer Umsetzung der CO<sub>2</sub>-Minderungsmöglichkeiten durch Austausch fossiler Energieträger entgegenstehen, sind der Jahrhundertvertrag zur Kohleverstromung, die Richtlinien der Internationalen Energieagentur und der Europäischen Gemeinschaft sowie der § 12 des 3. Verstromungsgesetzes bezüglich der Gasnutzung im Kraftwerkssektor sowie eine eventuell begrenzte Kapitalverfügbarkeit für die Umrüstung bestehender Anlagen und die notwendige Infrastruktur (Rohrnetz) für die Ausweitung des Gaseinsatzes.

Grundsätzlich sind die ermittelten Ergebnisse der Möglichkeiten einer Reduktion klimarelevanter Spurengasemissionen durch einen Austausch fossiler Energieträger untereinander als eine „erste Bilanz“ im Sinne einer ersten Abschätzung zu verstehen, die zumindest partiell weiterer vertiefter Untersuchungen bedürfte. Dennoch läßt sich festhalten, daß die Substitution fossiler Energieträger untereinander im Hinblick auf die Möglichkeiten der Minderung klimarelevanter Spurengase alleine keine langfristig tragfähige Lösung darstellt. Die hier bestehenden Möglichkeiten könnten jedoch einen wesentlichen Beitrag für die Eingrenzung negativer Klimaveränderungen in der Übergangsphase hin zu einer weitgehend CO<sub>2</sub>-freien Energieversorgung leisten, wobei besonders der verstärkte Erdgaseinsatz hervorzuheben ist.

## 5. Zusammenfassung und Bewertung der Ergebnisse des Studienkomplexes „Nutzung der Kernenergie“

### 5.1 Minderung klimarelevanter Spurengasemissionen durch Kernenergie<sup>1)</sup>

Die Kernenergie ist neben den erneuerbaren Energiequellen eine weitere uns heute zur Verfügung stehende Energiequelle, deren Nutzung nicht mit der Emission von Spurengasen verbunden ist, die gegenwärtig, wie das CO<sub>2</sub>, maßgeblich am Treibhauseffekt beteiligt sind. Die Substitution CO<sub>2</sub>-behafteter Energieerzeugung durch Kernenergie kann somit zur Minderung klimarelevanter Spurengase beitragen. Zu be-

trachten sind in diesem Zusammenhang, neben dem Bereich der Stromerzeugung, auch die Möglichkeiten der Erzeugung anderer Sekundärenergieträger sowie die Bereitstellung von Prozeß-, Fern- und Nahwärme mittels Kernenergie.

Im Rahmen des Studienkomplexes A.4 (Nutzung der Kernenergie) wurden verschiedene Themenbereiche parallel von zwei Arbeitsgruppen bearbeitet. Dabei ergaben sich Widersprüche und insbesondere kontroverse Einschätzungen, die auch von den Koordinatoren nicht aufgelöst werden konnten. Die hier wiedergegebene zusammengefaßte Darstellung der Ergebnisse versucht die Fakten und den Sach- bzw. Erkenntnisstand darzustellen. Auf eine Darstellung unterschiedlicher Einschätzungen und kontroverser Auffassungen wird hier bewußt verzichtet. Dazu sei auf den Bericht der Koordinatoren des Studienkomplex A.4 verwiesen.

#### 5.1.1 Stand der Technik und Entwicklungsperspektiven der Kernenergie

Mitte 1989 waren weltweit 429 Kernkraftwerksblöcke mit einer Gesamt Nettoleistung von 325400 Megawatt elektrisch (MW<sub>el</sub>) in Betrieb, weitere 110 Kernkraftwerke mit einer Leistung von 95400 MW<sub>el</sub> befanden sich im Bau. Die Kernkraftwerke trugen 1989 zu rund 17 Prozent zur weltweiten Stromerzeugung bei. In einigen Ländern entfallen mehr als 70 Prozent der gesamten Stromerzeugung auf Kernenergie. In der Bundesrepublik Deutschland (ohne ehemalige DDR) wurden 149 TWh Elektrizität im Jahr 1989 in Kernkraftwerken erzeugt, dies entspricht 33 Prozent der gesamten Bruttostromerzeugung. Die installierte Bruttoleistung der Kernkraftwerke in der Bundesrepublik Deutschland (ohne ehemalige DDR) beträgt 23600 MW<sub>el</sub> Ende 1989 und verteilt sich auf 21 Anlagen.

Die weltweite Betriebserfahrung, ausgedrückt in Reaktorbetriebsjahren, hat die 5000 Jahre-Marke überschritten. Von den 429 weltweit in Betrieb befindlichen Kernkraftwerksblöcken sind 328 Leichtwasserreaktoren, davon 242 mit einem Druckwasserreaktor (DWR) und 86 mit einem Siedewasserreaktor (SWR) ausgerüstet. Alle in der Bundesrepublik Deutschland (ohne ehemalige DDR) derzeit in Betrieb befindlichen Reaktoren sind Leichtwasserreaktoren.

#### Leichtwasserreaktoren (LWR)

Leichtwasserreaktoren sind mit leichtem Wasser gekühlte und moderierte Reaktoren. Als Kernbrennstoff wird leicht angereichertes Uran in Form von keramischen Urandioxid-Tabletten eingesetzt. Die Brennstofftabletten befinden sich in Hüllrohren aus Zirkaloy, die zu Brennstoffbündeln zusammengefaßt sind. Beim LWR wirkt der negative Reaktivitätskoeffizient einer Leistungserhöhung (aufgrund physikalischer Gegebenheiten) entgegen. Dies ist eine wichtige inhärente Sicherheitseigenschaft zur Verhinderung unkontrollierter Leistungsexkursionen. Mit den Erfahrungen aus dem Betrieb und aus Störfällen, durch ein umfangreiches Forschungs- und Entwicklungsprogramm sowie aufgrund detaillierter Risikoanalysen,

<sup>1)</sup> Dieser Teil wurde im Rahmen der zusammenfassenden Energiestudie (vgl. Kapitel 6) von Prof. Dr. Voß federführend bearbeitet.

konnten LWR-Anlagen bezüglich ihrer Sicherheit, Verfügbarkeit, Betriebseigenschaften, der Strahlenbelastung des Betriebspersonals sowie der Abgabe von Radioaktivität (bis auf Tritium) an die Umgebung ständig weiterentwickelt werden. LWR werden als Druckwasserreaktoren (DWR) (Zweikreisanlagen) und als Siedewasserreaktoren (SWR) (Einkreisanlagen) ausgeführt.

Den gegenwärtigen Stand der DWR-Entwicklung in der Bundesrepublik Deutschland (ohne ehemalige DDR) stellen die sogenannten Konvoi-Anlagen Isar-2 (KKI-2), Emsland (KKE) und Neckarwestheim-2 (GKN 2) dar. Sie haben eine Leistung von rund 1300 MW<sub>el</sub>. Der Sicherheitsbehälter (Containment) ist kugelförmig aus Stahl geschweißt. Er umschließt alle Primärkreis Komponenten und hat einen Durchmesser von 56 m. Die Anlagen sind mit einem dreistufigen Kontroll- und Schutzsystem zur Überwachung der Betriebsparameter, die kontinuierlich und redundant gemessen werden, ausgestattet. Durch die betrieblichen Regelsysteme werden die Parameter in einem vorgegebenen Regelband gehalten. Bei einer Überschreitung werden von dem Begrenzungssystem Gegenmaßnahmen eingeleitet, die die Größen wieder auf den Sollwert zurückbringen. Erst wenn dies nicht gelingt und ein Parameter seinen zulässigen Grenzwert überschreitet, tritt das Reaktorschutzsystem in Aktion und veranlaßt Gegenmaßnahmen, zum Beispiel die Reaktorabschaltung. Das Not- und Nachkühlssystem besteht aus vier getrennten Strängen mit einer eigenen Notstromversorgung.

In der Bundesrepublik Deutschland (ohne ehemalige DDR) sind sieben Siedewasserreaktoren mit einer Nettoleistung von 6885 MW<sub>el</sub> in Betrieb. Siedewasserreaktoren sind Einkreisanlagen. Der im Reaktorkern erzeugte Dampf wird in Wasserabscheidern getrocknet und direkt zur Turbine geführt. Der Sicherheitsbehälter ist aus Spannbeton und auf der Innenseite mit einer Stahlblechhaut abgedichtet. Er enthält den Reaktordruckbehälter und alle primärkühlmittelführenden Rohrleitungen bis zur ersten Absperrarmatur. Das Not- und Nachkühlssystem besteht aus 3 räumlich getrennten, voneinander unabhängigen 100 %-Strängen mit Wärmetauscher, Nieder- und Hochdruckpumpe.

LWR haben ein hohes Lastfolgevermögen und können auch im Mittellastbereich gefahren werden. Eine Auskopplung von Dampf zur Fernwärmeerzeugung (Kraft-Wärme-Kopplung) ist auch bei den bestehenden Anlagen möglich. Ausgehend vom erreichten technologischen Stand werden weltweit erhebliche Anstrengungen zur Weiterentwicklung der Leichtwasserreakorteknik unternommen. Die verschiedenen derzeit laufenden Weiterentwicklungen lassen sich vereinfacht in zwei Entwicklungslinien einteilen, einmal in eine mehr evolutionäre Weiterentwicklung der Anlagenkonzepte heutiger Bauart und zum anderen in die Entwicklung neuer Konzepte mit weitergehenden „inhärenten“ Sicherheitseigenschaften und einer weitergehenden Anwendung passiver anstelle aktiver Komponenten, insbesondere bei Anlagen kleiner und mittlerer Leistungsgröße. Einige der Weiterentwicklungen ließen sich bereits in den nächsten, zu bauenden Anlagen realisieren, während für die Konzepte, die weitgehend auf passiven Sicherheitsein-

richtungen aufbauen, gegebenenfalls noch Demonstrationsanlagen gebaut werden müssen, bevor die Erfahrungen für eine Markteinführung ausreichen.

### Hochtemperaturreaktoren (HTR)

Der Hochtemperaturreaktor gehört zur Familie der gasgekühlten Reaktoren. Diese ist zu etwa 10 Prozent an der bisherigen Stromerzeugung durch nukleare Anlagen beteiligt. Gegenüber den gasgekühlten Reaktoren der ersten Generation unterscheidet sich der HTR durch einige wichtige Merkmale. Als Wärmeübertragungsmittel wird Helium statt Kohlendioxid und statt der metallischen oder oxidischen stabförmigen Brennelemente werden keramisch umhüllte Partikel verwendet, die in der deutschen Entwicklung in kugelförmige Brennelemente aus Graphit eingebettet sind. Damit sind hohe Temperaturen für die Realisierung von hohen Wirkungsgraden bei der Stromerzeugung und die Erzeugung von Prozeßwärme möglich. Die Brennelemente weisen besonders günstige Eigenschaften im Hinblick auf die Rückhaltung von Spaltprodukten bei Normalbetrieb und Störungen auf. Aus der Physik der HTR ergibt sich eine kleine Leistungsdichte, das heißt der Reaktorkern ist relativ groß und hat eine sehr große Wärmekapazität.

Im Jahr 1986 wurde in der Bundesrepublik Deutschland (ohne ehemalige DDR) der THTR-300 als Prototyp für einen großen HTR-Kugelhaufenreaktor in Betrieb genommen. Beim Betrieb trat eine Beschädigung an einigen Befestigungselementen der Wärmeisolierung in den Heißgaskanälen auf. Im Sommer 1989 wurde die Stilllegung des THTR beschlossen, wobei der Weiterbetrieb der Anlage nach Ansicht von Betreiber, RSK und Sachverständigen aus sicherheitstechnischer Sicht möglich gewesen wäre.

Die Weiterentwicklungen des HTR zielen einmal auf einen Reaktor mit einer Leistung von 550 MW<sub>el</sub> (HTR-500) zur Stromerzeugung und gekoppelten Kraft-Wärme-Erzeugung und zum anderen auf die Entwicklung von Anlagen kleiner Leistung (200 MW<sub>th</sub>) für die Stromerzeugung sowie zur Prozeßdampf-, Fern- und Nahwärmebereitstellung ab. Des weiteren werden Verbesserungen der Wirtschaftlichkeit und Weiterentwicklungen der Sicherheit angestrebt. In dieser Hinsicht zeichnen sich große Vorteile eines neuartigen korrosionsgeschützten Brennelements ab. Die kugelförmigen Brennelemente sollen mit einer Schicht aus Siliziumkarbid versehen und damit widerstandsfähig gegenüber Dampf, Wasser und Luft werden. Ihre Zerstörung durch Fremdmedien wäre damit ausgeschlossen und „größere“ Freisetzungen von Radioaktivität wären nicht möglich.

### Schneller Brutreaktor (SBR)

Die energiewirtschaftliche Bedeutung von Schnellen Brütern liegt darin, daß sie das Natururan bis zum 60fachen besser als die herkömmlichen Leichtwasserreaktoren ausnutzen können und damit von einer äußeren Spaltstoffquelle nahezu unabhängig sind. Durch die Verwendung schneller Neutronen für den Kernspaltungsprozeß und von Plutonium als Spaltma-

terial kann die Erzeugungsrates von Spaltstoff eines solchen Reaktors auf über eins ansteigen, das heißt Brüter erzeugen dann mehr Spaltstoff, als sie im Betrieb verbrauchen. Auf dem Umweg über Plutonium sind Brüter damit in der Lage, das reichlich vorhandene, direkt nur schwer spaltbare Uran-238 für die Energieerzeugung nutzbar zu machen. Dies erfordert allerdings zwingend eine Wiederaufbereitung der abgebrannten Brennelemente, um das erbrütete Plutonium wiederverwenden zu können.

Der erreichte Entwicklungsstand der Brutreaktoren ist durch den Betrieb einer Reihe von Versuchs-, Prototyp beziehungsweise Großbrüterkraftwerken gekennzeichnet. In sämtlichen heute betriebenen Brüterreaktoren der Welt wird als Wärmeübertragungsmittel flüssiges Natrium (Na) benutzt. Natrium bremst Neutronen kaum ab, hat eine hervorragende Wärmeleitfähigkeit und erfordert keinen wesentlichen Betriebsdruck. Das Sicherheitskonzept des Schnellen Brutreaktors weist viele Gemeinsamkeiten mit den thermischen Reaktoren auf, aber auch einige brüterspezifische Sicherheitsaspekte, die mit dem Kühlmittel Natrium zusammenhängen.

Die internationalen Forschungs- und Entwicklungsarbeiten richten sich in den letzten Jahren zunehmend auf Kostenreduktion und auf Ausnutzung von Sicherheitsmerkmalen der Natriumkühlung aus, wie zum Beispiel die Möglichkeit einer passiven Nachwärmeabfuhr. Die westeuropäischen Anstrengungen sind auf die Entwicklung des European Fast Reactor (EFR) mit einer Leistung von 1520 MW<sub>el</sub> ausgerichtet, dessen Nachwärme mittels Naturkonvektion abgeführt werden soll.

### Heizreaktoren

Im In- und Ausland wurden in den letzten Jahren verschiedene Konzepte für Heizreaktoren mit einem thermischen Leistungsbereich von 10 bis 500 MW<sub>th</sub> entwickelt. Diese vergleichsweise kleinen Reaktoren dienen ausschließlich der Wärmeerzeugung bis ca. 170 °C für die Versorgung von Nah und Fernwärmenetzen. In der UdSSR befinden sich zwei Heizreaktoren vom Typ AST-500 für die Fernwärmeversorgung der Städte Gorki und Voronesch in Bau. In China wurde 1986 mit dem Bau eines 5 MW-Prototyp-Heizreaktors begonnen und in Kanada befindet sich ein Demonstrationsheizreaktor vom Typ „Slowpoke“ in der Erprobungsphase.

Die nuklearen Heizreaktoren unterscheiden sich in der Regel von großen Kernkraftwerken durch eine niedrige thermische Leistung beziehungsweise Leistungsdichte, eine niedrige Kühlmitteltemperatur (< 200 °C) und niedriges Druckniveau, eine konservative Kernauelegung, lange Betriebszyklen (bis 15 Jahre), passive Systeme zur Abfuhr der Wärme und Nachwärme, hohe inhärente Sicherheitseigenschaften, hohe Karenzzeiten, kleine Abmessungen, damit ist zum Beispiel die Untergrundbauweise zum Schutz vor Einwirkungen von außen ohne großen Aufwand möglich. Damit weisen die Heizreaktoren günstige konzeptionelle und technische Merkmale für die Erfüllung weitgehender sicherheitstechnischer Anforderungen und Schutzziele auf, auch im Hinblick auf

siedlungsnahen Standorte. Der Bau von Demonstrationsanlagen müßte dem Einsatz in größerem Umfang vorausgehen.

### Nutzungs- und Anwendungsmöglichkeiten der Kernenergie

Zum gegenwärtigen Zeitpunkt wird die Kernenergie fast ausschließlich zur Stromerzeugung eingesetzt. Neben der Stromerzeugung kann Kernenergie in einer Vielzahl von weiteren Energiewandlungsprozessen genutzt werden, weil die primäre Energieumwandlung in Kernreaktoren die Produktion von Wärmeenergie ist. Zu nennen ist die Erzeugung von Wasserstoff, die Erzeugung von Fern- und Nahwärme, die Erzeugung von Prozeßwärme und -dampf, die Erzeugung von Fernenergie (chemische Energie in Form von Synthesegas) sowie die Veredelung fossiler Energieträger. Die Techniken zur Erzeugung dieser Sekundärenergieträger mittels nuklearer Wärme sind weitgehend entwickelt, aber nur im Fall der Stromerzeugung auch in den Markt eingeführt.

### Kernfusion

Unter dem Begriff der Kernfusion wird der kontrollierte Prozeß der Verschmelzung leichter Kerne zu Helium unter Freisetzung von Energie verstanden. Die Fusionsforschung versucht, die aus den thermonuklearen Prozessen in der Sonne vertraute exotherme Natur der Fusionsprozesse leichter Kerne in kontrollierter Form einer praktischen Nutzung zuzuführen. Unter der Vielfalt von Fusionsprozessen kommt für die praktische Anwendung in absehbarer Zeit nur die Verschmelzung der Wasserstoffisotope Deuterium (D, schwerer Wasserstoff) und Tritium (T, überschwerer Wasserstoff) zu Helium (He) in Frage.

Es gibt verschiedene Möglichkeiten, den Fusionsprozeß einzuleiten, zum Beispiel über einen Trägheitsanschluß oder einen magnetischen Anschluß des Plasmas. Letzteres ist die Fusionstechnologie, die in Europa in großem Maßstab zur Energiegewinnung entwickelt wird. Aus den verschiedenen im Lauf der Jahre verfolgten Konzepten des magnetischen Plasmaeinschlusses hat sich eine toroidale Konfiguration (Form eines Autoreifens) des Plasmas durchgesetzt. In Deutschland werden die Tokamak- und die Stellaratorlinie verfolgt, wobei der Tokamak den Zielparametern für einen Fusionsreaktor bislang am nächsten kommt. Mit den zur Zeit verfolgten Großexperimenten zum Beispiel des JET (Joint European Torus) versucht man, die sogenannten „break even“ Bedingungen (Verhältnis der Alpha-Teilchenheizleistung zur Zusatzheizung=1), eine Vorstufe für die „Zündung“ des Plasmas, zu erreichen. Über eine weitere Stufe (Großexperimente NET oder ITER) sollen dann die notwendigen plasmaphysikalischen und technischen Kenntnisse zur Auslegung und zum Bau eines Demonstrationsreaktors gewonnen werden.

Die physikalische und technische Machbarkeit der Fusion sowie ihre Wirtschaftlichkeit wird sich erst im Verlauf der langfristig angelegten Entwicklungsschritte herausstellen können. Zur Zeit rechnet man

beim magnetischen Einschluß (Tokamak) damit, daß bis zum Ende von JET (Mitte der neunziger Jahre) alle wesentlichen plasmaphysikalischen Fragestellungen eines Reaktors beantwortet sind und Plasmen mit wesentlicher Alpha-Teilchenheizung untersucht wurden. Bis etwa 2020 sollte die technologische Durchführbarkeit eines Reaktors mit den Erfahrungen von NET bzw. ITER beurteilt werden können. Eine abschließende Beurteilung der technischen und wirtschaftlichen Aspekte der Kernfusion wird erst ab 2050 mit den Erfahrungen eines Demonstrationsreaktors möglich sein, dessen Bau ca. 2010 beginnen könnte. Vor dem Hintergrund dieses Entwicklungshorizontes ist die Kernfusion als Option für eine Minderung der CO<sub>2</sub>-Emissionen in der ersten Hälfte des nächsten Jahrhunderts nicht weiter zu diskutieren.

### 5.1.2 Umwelt-, Sicherheits-, Risiko- und Entsorgungsaspekte der Kernenergie

Die Energieerzeugung durch Kernspaltung ist mit Auswirkungen auf die Umwelt, Risiken und gegebenenfalls sonstigen unerwünschten Nebeneffekten verbunden, deren Ausmaß durch technische Vorsorge und sonstige Maßnahmen beeinflusst werden kann. Ausgangspunkt für diese potentiell nachteiligen Wirkungen sind die notwendigerweise mit der Kernspaltung in Reaktoren entstehenden Spalt- und Aktivierungsprodukte sowie die zur Energieerzeugung benötigten spaltbaren Materialien.

Als Grundlage für Entscheidungen hinsichtlich der Nutzung einer Technik sind die Risiken und negativen Effekte im Zusammenhang mit dem erwarteten Nutzen dieser Technik zu sehen. Für einen Vergleich der Kerntechnik mit anderen Energieversorgungsoptionen wären in vergleichbarer Weise deren Risiken, Umwelt- und Nebeneffekt und ihr Nutzen zu betrachten. Ein derartig umfassender Ansatz wurde bei den Untersuchungen zu den anderen CO<sub>2</sub>-Minderungsmöglichkeiten im Rahmen der Studienkomplexe A nicht verfolgt.

### Sicherheit und Risiken von Kernkraftwerken

Ziel der Reaktorsicherheit ist es, den Einschluß der in einem Kernkraftwerk vorhandenen radioaktiven Stoffe sicherzustellen und die normalbetrieblichen Emissionen unterhalb festgelegter Maximalwerte zu halten. Im Zusammenhang mit der Behandlung sicherheitstechnischer Fragen werden verschiedene Anlagenzustände unterschieden, und zwar:

- bestimmungsgemäßer Betrieb,
- Störfälle: Ereignisabläufe für die die Anlage so ausgelegt ist, daß die Folgen für die Umgebung bestimmte Grenzen nicht überschreiten. Sogenannte Auslegungsstörfälle dienen dabei als Bemessungsgrundlage für die sicherheitstechnische Auslegung des Kernkraftwerkes.
- Unfälle: Jenseits der sicherheitstechnischen Auslegung verbleibt ein Bereich denkbarer Ereignisabläufe, die als Unfälle oder auslegungsüberschreitende Störfälle bezeichnet werden. Hierun-

ter werden Ereignisabläufe verstanden, die nach menschlichem Ermessen so unwahrscheinlich sind, daß eine Auslegung der Anlage zu ihrer Vermeidung nicht erfolgen muß. Kernkraftwerke besitzen auch dann noch Sicherheitsreserven, wenn Auslegungsgrenzen überschritten werden. Diese werden bei auslegungsüberschreitenden Störfällen im Rahmen anlageninterner Notfallmaßnahmen genutzt, um Kernschäden zu verhindern bzw. die Schadensfolgen wirksam zu begrenzen.

Für die Ableitung radioaktiver Stoffe beim bestimmungsgemäßen Betrieb von Kernkraftwerken werden in den Genehmigungen Grenzwerte festgelegt, die sich aus den Anforderungen der Strahlenschutzverordnung ableiten. Die Ableitung radioaktiver Stoffe erfolgt mit der Fortluft und dem Abwasser, und sie wird ständig überwacht. Bis auf wenige Ausnahmen betragen die tatsächlichen Ableitungen der Edelgase, des Jods und der Aerosole mit der Fortluft bei den Leichtwasserreaktoren ca. 1 Prozent der Genehmigungswerte oder weniger. Dies gilt auch für die Ableitung mit dem Abwasser außer Tritium. Die zulässigen Ableitungswerte für Tritium mit dem Abwasser wurden 1988 durchschnittlich zu 10 Prozent bis zu einem maximalen Prozentsatz von 43 Prozent ausgeschöpft. Bezogen auf die erzeugte Strommenge haben sich die Ableitungswerte bis auf die von Tritium und C-14 in den letzten zehn Jahren um mindestens eine Zehnerpotenz verringert. Die durch die radioaktiven Abgaben des bestimmungsgemäßen Betriebs in der Umgebung des Kernkraftwerks hervorgerufene Strahlenexposition liegt in einem Bereich von 0,1 bis 1 Prozent der mittleren natürlichen Strahlenexposition der Bevölkerung.

Im Rahmen des Genehmigungsverfahrens ist der Nachweis zu führen, daß die nach Stand von Wissenschaft und Technik erforderliche Vorsorge gegen Schäden durch die Errichtung und den Betrieb der Anlage getroffen ist. Dies betrifft insbesondere den Nachweis, daß Störfälle, die im Kernkraftwerk auftreten können, durch die bestehenden Sicherheitseinrichtungen jederzeit beherrscht werden und keine unzulässige Freisetzung radioaktiver Stoffe in die Umgebung der Anlage auftritt. Dazu wird eine Reihe störfallauslösender Ereignisse postuliert, wobei man zwischen anlageninternen Ereignissen z. B. Störungen der Kernkühlung und Einwirkungen von außen z. B. durch Erdbeben und Flugzeugabsturz unterscheidet. Für die Beherrschung dieser sogenannten Auslegungsstörfälle sind die sicherheitstechnischen Einrichtungen des Kernkraftwerkes auszulegen.

Das Sicherheitskonzept zur Gewährleistung des sicheren Einschlusses der radioaktiven Stoffe beruht dabei auf sogenannten inhärenten, also dem Reaktor innewohnenden physikalischen, naturgesetzlichen Sicherheitseigenschaften und ingenieurtechnischen Sicherheitsmaßnahmen. Wesentliche Grundelemente sind mehrfach gestaffelte Aktivitätsbarrieren, mehrstufige Sicherheitsebenen und die Auslegungsgrundsätze für Sicherheitseinrichtungen. Die Auslegungsgrundsätze für Sicherheitseinrichtungen verlangen, daß die Funktion der Sicherheitssysteme auch bei Ausfall eines Teilsystems (Einzelfehlerkriterium) und bei gleichzeitiger Freischaltung eines weiteren Teilsystems aufgrund von Wartungs- und Reparaturmaß-

nahmen erhalten bleibt. Darüber hinaus werden eine Reihe von Auslegungsgrundsätzen wie Redundanz, Diversität, sicherheitsgerichtetes Ausfallverhalten (failsafe), Selbstüberwachung, Automatisierung, Entmischung und räumliche Trennung beachtet.

Neben Störfalluntersuchungen, die von vorab festgelegten Störfällen ausgehen, wurden in der Kerntechnik schon frühzeitig probabilistische Risikountersuchungen zur technischen Sicherheitsbeurteilung durchgeführt. Sie dienen zum einen der Identifizierung von Schwachstellen und sicherheitstechnischen Verbesserungen und zum anderen dazu, das mit Unfällen in Kernkraftwerken verbundene Risiko abzuschätzen.

Für die Bundesrepublik Deutschland liegen zwei Risikostudien vor, die Deutsche Risikostudie Kernkraftwerke Phase A (Veröffentlichung 1979) und die Deutsche Risikostudie Phase B (Veröffentlichung 1989). Referenzanlage für die Untersuchungen in Phase B wie in der Phase A ist der Druckwasserreaktor Biblis B, der 1976 in Betrieb genommen wurde. In Phase B wurden zwischenzeitlich erfolgte Änderungen an der Anlage berücksichtigt und wesentlich detailliertere systemtechnische Untersuchungen durchgeführt als in Phase A. Die wesentlichen Ergebnisse der DRS-Phase B lauten:

- Insgesamt beträgt die rechnerisch ermittelte Häufigkeit der durch die Sicherheitssysteme nicht beherrschten Ereignisabläufe etwa  $3 \cdot 10^{-5}/a$ . (Dies bedeutet drei nicht beherrschte Ereignisabläufe je Reaktor in hunderttausend Jahren.)
- Nahezu alle systemtechnischen nicht beherrschten Ereignisabläufe führen zu einem Anlagenzustand unter hohem Druck im Reaktorkühlkreislauf. Diese Ereignisabläufe sind zunächst mit langsamen Zustandsänderungen im Reaktorkühlkreislauf verbunden, die nicht sofort zum Kernschmelzen führen.

In der Anlage besteht eine Reihe verschiedener und flexibler Möglichkeiten, nach einem Ausfall von Sicherheitssystemen Notfallmaßnahmen vorzunehmen, um ein Kernschmelzen zu verhindern oder wenigstens zu verzögern. Ausführlich wurden hierzu in der Studie Maßnahmen untersucht, mit denen nach einer Druckentlastung des Reaktorsystems die Kühlung des Kerns und die Wärmeabfuhr aus dem Reaktor wiederhergestellt werden, bevor ein Schmelzen des Brennstoffs einsetzen kann.

Für die Untersuchungen zur Studie lagen noch keine detaillierten Unterlagen vor, um anlageninterne Notfallmaßnahmen im einzelnen bewerten zu können. Die untersuchten Notfallmaßnahmen konnten daher nur vorläufig bewertet werden. Sind sowohl sekundärseitige als auch primärseitige Maßnahmen zur Wiederherstellung der Kernkühlung möglich, wurde angenommen, daß die Maßnahmen in 99 von 100 Fällen erfolgreich durchgeführt werden. Für einige Ereignisabläufe mit ungünstigeren Anlagen- oder Zeitbedingungen wurde eine geringere Erfolgswahrscheinlichkeit angesetzt.

Insbesondere kann – auch bei Versagen der Maßnahmen zur Wiederherstellung der Kernkühlung – Kernschmelzen unter hohem Druck vermieden werden, wenn der Reaktorkühlkreis von hohem Druck entlastet wird, bevor es zum Kernschmelzen kommt.

Mit den Maßnahmen wird die Häufigkeit nicht beherrschter Ereignisabläufe von ca.  $3 \cdot 10^{-5}/a$  um etwa eine Größenordnung herabgesetzt. So ergibt sich für Kernschmelzen unter niedrigem Druck eine Häufigkeit von ca.  $4 \cdot 10^{-6}/a$  und für Kernschmelzen unter hohem Druck eine Häufigkeit von ca.  $5 \cdot 10^{-7}/a$ .

- Stellvertretend für Unfälle mit frühzeitigem und großflächigem Versagen des Sicherheitsbehälters wurde in Phase A eine Dampfexplosion im Reaktordruckbehälter angenommen, die den Reaktordruckbehälter zerstört und zugleich den Sicherheitsbehälter beschädigt. Die Auswertungen von Experimenten und theoretischen Untersuchungen zur Dampfexplosion ergeben, daß eine heftige Dampfexplosion, die zur Zerstörung des Sicherheitsbehälters führt, nicht eintreten kann oder zumindest extrem unwahrscheinlich ist. Sie wird daher in Phase B als risikorelevanter Unfallpfad ausgeschlossen.

Dennoch sind nach gegenwärtiger Kenntnis und den in Phase B durchgeführten Untersuchungen Unfallabläufe möglich, die die Integrität des Sicherheitsbehälters frühzeitig gefährden können. Sie können bei einem Kernschmelzen unter hohem Druck auftreten oder durch eine Wasserstoffverbrennung im Sicherheitsbehälter verursacht werden.

Zu beiden Unfallsituationen sind weitere Untersuchungen notwendig.

So ist für Unfallabläufe mit einem Kernschmelzen unter hohem Druck zu klären, ob es zu einem Versagen an anderer Stelle des Reaktorkühlkreises kommen kann, bevor der Reaktordruckbehälter versagt.

In Phase A wurde dem damaligen Kenntnisstand entsprechend angenommen, daß der bei einem Kernschmelzunfall gebildete Wasserstoff kontinuierlich verbrennt. Die Untersuchungen zur Phase B zeigen aber, daß sich im Sicherheitsbehälter auch höhere Anreicherungen von Wasserstoff ausbilden können, die bei einer Zündung den Sicherheitsbehälter gefährden. Technische Gegenmaßnahmen (Zündkerzen, katalytische Folien), mit denen der Wasserstoffgehalt im Sicherheitsbehälter begrenzt und eine gefährliche Verbrennung verhindert wird, werden untersucht. Doch sind zum technischen Einsatz solcher Maßnahmen noch weitere Entwicklungsarbeiten erforderlich.

Kann eine Wasserstoffanreicherung, die bei einer Verbrennung den Sicherheitsbehälter gefährdet, ausgeschlossen werden, liegt in Phase B die Eintrittshäufigkeit für ein frühzeitiges und großflächiges Versagen des Sicherheitsbehälters niedriger als in Phase A.

In den Schlußfolgerungen wird festgestellt, daß die ermittelten Ergebnisse für die Anlage Biblis B nicht



ohne weiteres auf andere Kernkraftwerke mit Druckwasserreaktoren übertragen werden können. Aufgrund der steten Weiterentwicklung der Sicherheitstechnik weisen also die bestehenden Druckwasserreaktoren unterschiedliche sicherheitstechnische Eigenschaften auf. Ohne daß dies durch anlagenspezifische Risikoanalysen belegt ist, wird davon ausgegangen, daß in älteren Anlagen, trotz der vorgenommenen Nachrüstmaßnahmen, ein geringerer sicherheitstechnischer Stand vorzufinden ist als in neueren Anlagen. Bezogen auf das in der DRS, Phase B, als Referenzanlage untersuchte Kraftwerk Biblis B sind zwei der derzeit in Betrieb befindlichen Druckwasserreaktoren älteren Baujahrs und elf Anlagen später in Betrieb gegangen. Für die neueren Anlagen ist tendenziell von einem höheren Sicherheitsstand auszugehen. Für die drei Konvoi-Anlagen (Inbetriebnahme 1988 bis 1989) wird die Häufigkeit für das Auftreten eines durch die Sicherheitssysteme nicht beherrschten Störfalles mit ca.  $1,4 \cdot 10^{-6}/a$  und für einen Kernschmelzunfall mit  $3,5 \cdot 10^{-7}/a$  angegeben. Diese Werte sind mehr als ein Faktor 10 kleiner als die entsprechenden Häufigkeiten der DRS, Phase B, für die Referenzanlage Biblis B.

Für Siedewasserreaktoren ist eine Risikostudie noch nicht abgeschlossen; aufgrund des gegenwärtigen Kenntnisstandes ist aber nicht zu erwarten, daß die Ergebnisse sich von den DWR-Ergebnissen fundamental unterscheiden.

Das Sicherheitskonzept und die Sicherheitstechnik kerntechnischer Anlagen sind in der Vergangenheit stetig verbessert und weiterentwickelt worden. Dies wird sich auch in der Zukunft fortsetzen. Heute bereits geplante beziehungsweise untersuchte Weiterentwicklungen und Verbesserungen lassen sich den folgenden Bereichen zuordnen:

1. Verstärkung der sicherheitstechnischen Auslegung (Auslegungsebene) z. B. dadurch, daß Schadensmöglichkeiten verringert oder beseitigt, Sicherheitssysteme verbessert oder zusätzlich installiert werden. Sicherheitsgewinne werden erreicht durch die Verringerung der Wahrscheinlichkeit für das Auftreten auslegungsüberschreitender, d. h. durch die Sicherheitssysteme nicht beherrschter Störfallereignisse.
2. Weiterentwicklung und Verbesserung im Bereich des Anlageninternen Notfallschutzes, um auslegungsüberschreitende Störfälle frühzeitig und sicher zu erkennen, zu kontrollieren oder mit möglichst geringen Schäden zu beenden. Dies betrifft sowohl präventive anlageninterne Notfallschutzmaßnahmen, die das Auftreten einer Kernschmelze verhindern, als auch Vorkehrungen und mitigative Accident-Management-Maßnahmen zur Erhaltung der Integrität des Sicherheitsbehälters.
3. Verstärkung und Ertüchtigung von Aktivitätsbarrieren, um auch bei hypothetischen auslegungsüberschreitenden Unfällen die Freisetzung von Aktivitäten in die Umgebung auszuschließen oder unter einer vorgegebenen Grenze zu halten. Dies läßt sich zum einen dadurch erreichen, daß das Containment so ausgelegt wird, daß seine Integrität nicht durch mechanische Einwirkungen als Folge einer Kernschmelze (Versagen des Reaktor-

druckbehälters unter hohem Druck, Wasserstoffdetonation, Dampfexplosion, Schmelze-Beton-Wechselwirkung) gefährdet werden kann (kernschmelzfestes Containment). Ein anderer Weg besteht darin, Kernschmelzen oder hinsichtlich ihrer Folgen vergleichbare Zustände aufgrund der physikalischen Auslegung des Reaktors, zum Beispiel durch geringe Leistung und Leistungsdichte, und daraus resultierenden inhärenten Sicherheitseigenschaften unmöglich zu machen. Die radioaktiven Substanzen bleiben dann immer innerhalb des Brennelements eingeschlossen.

Im Rahmen der internationalen Weiterentwicklung der Reaktoren werden Entwicklungen in allen drei genannten Bereichen verfolgt. In diesem Zusammenhang sind auch Konzepte und Überlegungen zu erwähnen, die die Sicherheitsziele durch eine weitergehende Anwendung inhärenter Sicherheitsfunktionen und passiver Sicherheitssysteme, die ohne aktive Schalthandlungen und ohne Fremdenergiezufuhr im Falle einer Störung wirksam werden (wie die Wärmeabfuhr durch Naturzirkulation oder über Wärmeleitung), zu verwirklichen.

Aufbauend auf dem bereits erreichten hohen Sicherheitsstandard der Konvoi-Anlagen, werden im Rahmen der sicherheitstechnischen Weiterentwicklung für die nächste Generation großer Druckwasserreaktoren eine Reihe von Verbesserungen vorgesehen beziehungsweise diskutiert. Ohne Anspruch auf Vollständigkeit seien hier genannt:

- die zusätzliche Installation eines passiven sekundärseitigen Nachwärmeabfuhrsystemes,
- die Einführung einer speicherprogrammierbaren digitalen Leit- bzw. Sicherheitsleittechnik,
- Auslegungsveränderungen, um die Zeitspanne für das Einleiten von anlageninternen Notfallschutzmaßnahmen sowie ihre Wirksamkeit auch bei Ausfall der gesamten Stromversorgung zu erhöhen,
- Auslegungsvorkehrungen, die die Kühlbarkeit der Schmelze gewährleisten und ein Durchdringen des Gebäudefundaments ausschließen.

Weitergehende Überlegungen sind auf die Entwicklung eines verstärkten kernschmelz sicheren Containments ausgerichtet, das den Belastungen bei Kernschmelzen unter vollem Systemdruck, von Dampfexplosionen,  $H_2$ -Detonationen und der Schmelze-Beton-Reaktion standhält und somit eine Freisetzung unzulässiger Mengen von Radioaktivität auch im Falle hypothetischer Unfälle verhindert.

Entwicklungen von kleinen und mittelgroßen Leichtwasserreaktoren mit einer Leistung bis zu 600 MW<sub>el</sub> sowie von kleinen Heizreaktoren verfolgen ein Sicherheitskonzept, das auf der primären Nutzung inhärenter Sicherheitseigenschaften und der Anwendung passiver anstelle aktiver Komponenten beruht. Auch für schnelle natriumgekühlte Brutreaktoren werden derartige Konzepte verfolgt.

Im Bereich der gasgekühlten Hochtemperaturreaktoren (HTR) nutzt der entwickelte HTR-Modul konsequent die inhärenten Sicherheitseigenschaften des HTR zur Verwirklichung eines neuen Auslegungs-

ziels, das darin besteht, die Strahlenexposition in der Umgebung auch bei hypothetischen (auslegungsüberschreitenden) Ereignisketten im Bereich der durch die Strahlenschutzverordnung gezogenen Grenzen für Auslegungsstörfälle zu halten, ohne Kredit von aktiven Systemen oder auswirkungsmildernden Maßnahmen zu nehmen. Hauptsicherheitsmerkmal des HTR-Modul ist die Begrenzung der maximalen Kerntemperatur auf ca. 1600 °C unter allen Störfall- und hypothetischen Unfallbedingungen, so daß die Spaltprodukte praktisch vollständig im Brennelement eingeschlossen bleiben. Erreicht wird diese Temperaturbegrenzung durch die Wahl einer schlanken Kerngeometrie und eine geringe Leistungsdichte. Bei Ausfall aller aktiven Kühlsysteme wird die Nachwärme passiv über die Oberfläche des Reaktordruckbehälters abgeführt.

Die sich abzeichnenden und erkennbaren Fortschritte in der Sicherheitstechnik und Sicherheitskonzeption von Kernkraftwerken rechtfertigen nicht nur die Erwartung, daß die Eintrittswahrscheinlichkeit eines auslegungsüberschreitenden Ereignisses sowie eines Unfalls mit Kernschmelzen weiter reduziert wird, sondern auch, daß unabhängig von der Eintrittswahrscheinlichkeit unzulässige radiologische Auswirkungen auf die Umgebung aus anlageninternen Ursachen fast deterministisch ausgeschlossen werden können.

#### **Umwelt, Sicherheits- und Risikoaspekte der Ver- und Entsorgung von Kernkraftwerken**

Neben den Umwelteffekten und Risiken aus dem Reaktorbetrieb sind auch diejenigen im Zusammenhang mit den einzelnen Schritten der Brennstoffversorgung und der Entsorgung entstehenden Umweltbelastungen und Risiken für die Beschäftigten und die Bevölkerung zu betrachten. Dies betrifft die Uran-Gewinnung und -Aufbereitung, die Uran-Konversion und Anreicherung, die Brennelementherstellung, die Zwischenlagerung abgebrannter Brennelemente, den Abriß der Nuklearanlagen und je nachdem, ob von einer Wiederaufarbeitung der abgebrannten Brennelemente oder ihrer direkten Endlagerung ausgegangen wird, entweder die Wiederaufarbeitung, Konditionierung und Endlagerung radioaktiver Abfälle oder die Konditionierung und Endlagerung abgebrannter Brennelemente sowie die diversen Transportvorgänge.

Untersuchungen über die mit den einzelnen Schritten der Ver- und Entsorgung von Kernkraftwerken verbundenen radiologischen Belastungen im Normalbetrieb beziehungsweise der radiologischen Risiken aus Störfällen liegen weniger zahlreich vor als entsprechende Untersuchungen für den Betrieb von Leichtwasserreaktoren. Dennoch sind orientierende Aussagen möglich.

Beim Abbau und der Aufbereitung von Uran resultiert, bei Einhaltung der Strahlenschutzgrenzwerte, die hauptsächlich radiologische Belastung für die Beschäftigten wie auch für die in der näheren Umgebung lebende Bevölkerung aus den Emissionen von insbesondere Radon, aber auch von Staubteilen, die Uran und seine Zerfallsprodukte enthalten. Radon, ein radioaktives Edelgas und Zerfallsprodukt des Ur-

ans, ist in der kristallinen Struktur des Gesteins eingeschlossen und wird beim Aufschließen des Gesteins in die Atmosphäre freigesetzt. Die Lagerhalden von Urankonzentrat, vor allem die Abfallhalden, stellen eine Langzeitexpositionsquelle für die Umgebung über die Betriebsphase hinaus dar.

In den Bereichen Konversion, Anreicherung und Brennelementherstellung ist die radiologische Belastung sowohl für die Beschäftigten in den Anlagen wie auch für die Bevölkerung in der Umgebung vernachlässigbar gering. Die Gefährdung durch eine Konversionsanlage ist eher chemotoxischer als radiologischer Natur. Das gleiche gilt für eine Anreicherungsanlage. Die Herstellung von Uran-Brennelementen wird als eine der sichersten Stufen im Brennstoffkreislauf angesehen, da das zu verarbeitende Material chemisch stabil ist.

Die Herstellung von plutoniumhaltigen Brennelementen zur Rückführung von Plutonium zum Beispiel in Leichtwasserreaktoren erfolgt grundsätzlich in gleicher Weise wie die Herstellung von Uran-Brennelementen. Der wesentliche Unterschied der Plutoniumverarbeitung gegenüber der Uranverarbeitung besteht darin, daß die gesamte Verarbeitung in abgeschlossenen Systemen mit entsprechenden Abschirm- und Rückhaltmaßnahmen und einer entsprechenden sicherheitstechnischen Auslegung der Fabrikationsanlage erfolgt.

Nach ihrem Einsatz im Reaktor werden die abgebrannten Brennelemente bis zu ihrer Weiterverarbeitung zwischengelagert. Dies erfolgt zunächst in wassergekühlten Abklingbecken in der Reaktoranlage. Danach ist eine Lagerung in externen Zwischenlagern vorgesehen, wo sie in ihren Transportbehältern aufbewahrt werden (Trockenlagerung).

Je nachdem, ob die in den abgebrannten Brennelementen noch enthaltenen Stoffe Uran und Plutonium weiterverwendet werden sollen oder nicht, werden die Brennelemente wieder aufgearbeitet und die abgetrennten radioaktiven Abfallstoffe in ein Endlager verbracht oder sie werden nach einer mehr oder weniger ausgeprägten mechanischen Vorbehandlung in eine endlagerfähige Form gebracht (konditioniert) und als Abfallgebände endgültig gelagert. Im ersten Fall spricht man von einer integrierten Entsorgung, im zweiten von einer direkten Endlagerung.

Die vorliegenden Ergebnisse zur radiologischen Sicherheit der beiden Entsorgungswege weisen aus, daß der Entsorgungsweg mit Wiederaufarbeitung in den einzelnen Teilschritten (Transporte, Wiederaufarbeitung, Endlagerung) zu höheren Individual- und Kollektivdosen führt als der Entsorgungsweg ohne Wiederaufarbeitung. Dabei ist die Belastung aus Störfällen wesentlich niedriger als die jährliche Strahlenexposition durch den bestimmungsgemäßen Betrieb. In beiden Fällen werden jedoch die zulässigen Grenzwerte für den bestimmungsgemäßen Betrieb und bei Störfällen deutlich unterschritten. Die ermittelten Unterschiede zwischen den beiden Entsorgungswegen fallen in Relation zur natürlichen Strahlenbelastung praktisch kaum ins Gewicht.

Die für die Bundesrepublik Deutschland vorliegenden Untersuchungen zu den radiologischen Belastungen

und Risiken der Kernenergienutzung mittels Leichtwasserreaktoren bestätigen die auch in ausländischen Untersuchungen gemachte Tendenzaussage, daß das gegenwärtige Gesamtrisiko der Kernenergie im wesentlichen durch den Risikobeitrag des Kernkraftwerkes selbst bestimmt wird und daß die einzelnen Stationen der Brennstoffver- und entsorgung nur zu einem geringen Teil zum Risiko der nuklearen Stromerzeugung beitragen.

### Klimaaspekte radioaktiver Spurengase

Bei der Nutzung der Kernenergie werden in geringem Umfang radioaktive Gase in die Atmosphäre emittiert, von denen nur die Krypton-85-Emissionen von Bedeutung sind, da es sich wegen der langen Halbwertszeit und des alleinigen Abbaus durch radioaktive  $\beta$ -Zerfälle in der Atmosphäre anreichern kann.

Krypton-85 (Kr 85) ist ein chemisch inertes Edelgas, das bei der Kernspaltung entsteht. Das in Kernreaktoren erzeugte Krypton-85 wird nahezu ausschließlich bei der Wiederaufarbeitung von abgebrannten Elementen in die Atmosphäre freigesetzt und zerfällt dort mit einer Halbwertszeit von 10,7 Jahren zu Rubidium-85. Seit Beginn der militärischen und zivilen Nutzung der Kernenergie hat die Konzentration von Krypton-85 in der Erdatmosphäre kontinuierlich zugenommen. Sie beträgt derzeit etwa 1 Becquerel (Bq)/m<sup>3</sup>. Grundsätzlich kann Krypton-85 die Vorgänge in der Atmosphäre im wesentlichen über zwei Wirkungsmechanismen beeinflussen: über strahlenchemische Reaktionen und über luftelektrische Effekte. Eine direkte Treibhauswirkung geht von Krypton-85 nicht aus. Die durchgeführten Untersuchungen weisen auf die bestehenden Wissenslücken über die Wirkung einer erhöhten Ionisation der Luft auf die luftelektrischen Vorgänge und luftchemischen Prozesse in der Atmosphäre sowie in bezug auf ihre meteorologischen und klimatologischen Wirkungen hin. Dennoch lassen sich anhand der Größenordnung des gegenwärtigen und zukünftig zu erwartenden Einflusses von Kr-85 auf die natürlichen Luftionisationsprozesse einige erste Aussagen zur Klimarelevanz des Kr-85 ableiten:

- Der Beitrag der Kr-85-Aktivität zur gesamten Luftionisation ist derzeit vernachlässigbar klein (deutlich kleiner als 1 %).
- Der Anstieg der Kr-85-Aktivität in der Atmosphäre ist in der Vergangenheit überschätzt worden. Die Gründe dafür liegen in dem geringeren Zubau an Kernkraftwerksleistung und in der längeren Zeitspanne bis zur Wiederaufarbeitung des Brennstoffs (heute und in Zukunft rund 10 Jahre) nach Entladung aus dem Reaktor.
- Bei der derzeitigen Kr-85-Konzentration sind strahlenchemische Wirkungen von Bedeutung auszuschließen. Die luftchemischen Prozesse in der Atmosphäre werden auch bei den mittelfristig zu erwartenden höheren Kr-85-Konzentrationen durch photochemische und nicht durch strahlenchemische Reaktionen bestimmt.
- Die mittelfristig zu erwartenden Kr-85-Konzentrationen führen nur zu einer geringen Erhöhung der

gesamten Ionenkonzentration in der Atmosphäre und damit nach derzeitigem Kenntnisstand zu keiner nennenswerten Veränderung der luftelektrischen Situation.

- Selbst bei einem massiven Ausbau der Kernenergie kann, durch die Rückhaltung von Kr-85 bei der Wiederaufarbeitung (Rückhaltedaten heute verfügbarer Techniken 95 bis 99 %), ein Anstieg der Luftionisation durch Kr-85 auf unter 1 Prozent begrenzt werden.

### Mögliche andere Auswirkungen

In der Diskussion über die Kernenergie werden neben den zuvor angesprochenen Umwelt-, Sicherheits- und Risikoaspekten auch mögliche Auswirkungen auf das Sozial- und Gesellschaftssystem sowie die internationalen Belange problematisiert. Im Vordergrund stehen dabei einmal Befürchtungen, daß die im Zusammenhang mit der Kernenergienutzung notwendigen Sicherheits- und Sicherungsmaßnahmen z. B. zur Abwehr von Sabotage und Terrorismus, zur Einschränkung persönlicher Freiheitsrechte führen könnten und damit gegebenenfalls nicht mit der sozialen Ordnung und Entwicklung verträglich seien. Ein zweiter Problemkreis betrifft die eventuelle mißbräuchliche Verwendung von spaltbarem Material und von Anlagen aus dem zivilen Bereich für militärische und terroristische Zwecke. Diese beiden Aspekte werden in den Arbeiten zum Studienkomplex A.4 nur gestreift und nicht ausführlicher diskutiert.

Ein wichtiger Teilaspekt der internationalen Verträglichkeit ist, inwieweit von einer zivilen Kernenergienutzung die Gefahr einer Weiterverbreitung von Kernwaffen ausgeht (Proliferationsproblem). Die Verhinderung von Proliferation ist sowohl eine internationale Aufgabe als auch Aufgabe jedes einzelnen Staates. Wichtigster Eckpfeiler des internationalen Nonproliferationsnetzwerkes ist der Vertrag über die Nichtweiterverbreitung von Kernwaffen (Atomwaffensperrvertrag), der bisher von 140 Staaten unterzeichnet wurde. Artikel 1 dieses Nichtverbreitungsvertrages verpflichtet die Kernwaffenstaaten, keine Kernwaffen oder Kernsprengkörper weiterzugeben oder bei Bau und Entwicklung Unterstützung zu leisten. In entsprechender Weise ist in Art. 2 die Verpflichtung, keine Kernwaffen zu bauen oder anzunehmen, für die Nichtwaffenstaaten festgelegt. Art. 3 hat die Sicherheitskontrollen der IAEO zum Gegenstand, die zur Gewährleistung der ausschließlich friedlichen Nutzung der Kernenergie auf alle Aktivitäten der Nichtkernwaffenstaaten anzuwenden sind. Die der Nichtverbreitung dienenden Überwachungsmaßnahmen (Safeguard) sollen Staaten von einem möglichen Mißbrauch der zivilen Nutzung von Kernmaterialien oder Anlagen abhalten. Die internationalen Kontrollmaßnahmen zielen darauf ab, einen solchen Mißbrauch frühzeitig zu entdecken, nicht aber ihn physisch zu verhindern. Physischer Schutz (physical protection) dagegen liegt in nationaler Verantwortung. Es besteht weitgehend Übereinstimmung, daß die internationalen Safeguard-Kontrollen, mit ihren unterschiedlichen Maßnahmen, zu denen Materialbilanzierung, Messung, Beobachtung, Einschluß, Inspektion

sowie auch Überprüfung der Anlagenauslegung zählen, ein dichtes Netz bilden, das die Entdeckung von Abzweigungen ermöglicht und ein hohes Maß an Abschreckung garantiert.

### **Integrale und vergleichende Risikobetrachtungen**

Integrale und vergleichende Risikobetrachtungen dienen dem Ziel, die gesamten Risiken, die mit der Bereitstellung von Energie durch ein Energiesystem verbunden sind, zu erfassen und mit anderen Energiesystemen zu vergleichen. Vollständigkeit ist dabei in zweierlei Hinsicht anzustreben. Einmal sind alle Prozesse und Prozeßstufen sowie Anlagen von der Primärenergiegewinnung bis zur Energiebereitstellung gegebenenfalls einschließlich der Entsorgung zu erfassen und hinsichtlich ihrer Risikobeiträge zu quantifizieren, und zum anderen sind die verschiedenen Risikokategorien zu betrachten.

Geht man von einem sehr weitgefaßten Risikobegriff aus, der alle potentiell möglichen, materiellen und immateriellen Wagnisse und Schäden umfaßt, so ist festzustellen, daß eine Ermittlung oder auch nur Abschätzung eines derartigen Gesamtrisikos verschiedener Energieträger oder Energiesysteme nicht möglich ist, da sich viele Einzelrisiken einer quantitativen Erfassung entziehen. Dennoch lassen sich für einzelne Bereiche, z. B. für das Leben und die menschliche Gesundheit, vergleichende Risikoanalysen durchführen, die wichtige Teilaspekte für eine umfassende Bewertung von Energiesystemen darstellen.

Im Rahmen der Arbeiten des Studienkomplexes A.4 wurden integrale Risiken für die menschliche Gesundheit, die mit verschiedenen Technologien zur Stromerzeugung (Kohle, Öl, Gas, Kernenergie, Wind, Sonne) verbunden sind, abgeschätzt, die alle Risikobeiträge im Zusammenhang mit dem Bau, dem Betrieb und der Ver- und Entsorgung der betrachteten Energietechniken umfassen, wobei zwischen beruflichen und öffentlichen Risiken unterschieden wurde. Quantitativ wurde Risiko dabei als Produkt aus erwartetem Schadensumfang und Eintrittswahrscheinlichkeit definiert. Trotz bestehender Daten- und Wissenslücken lassen sich folgende Feststellungen treffen:

1. Es gibt keine „Nullrisiko-Option“. Auch die Stromerzeugung mittels erneuerbarer Energiequellen ist mit Risiken für das Leben und die Gesundheit verbunden.
2. Nach gegenwärtigem Wissensstand liegen die Risiken für die menschliche Gesundheit der Nutzung von Kohle im oberen Bereich der aufgespannten Risikobandbreite, während die Risiken bei Gas, den regenerativen Energiequellen und der Kernenergie im unteren Bereich liegen.
3. Die ermittelten Risiken können nicht so interpretiert werden, daß einzelne Energieträger unter Risikogesichtspunkten von der Anwendung ausgeschlossen werden sollten, insbesondere, wenn die Risiken der Stromerzeugung in Relation zu anderen Lebensrisiken gesehen werden.

### **Hemmnisse und Maßnahmen**

Hemmnisse im weitesten Sinne können zur Folge haben, daß die Möglichkeiten der Kernenergie zur Minderung energiebedingter Treibhausgasemissionen nicht oder nur zum Teil ausgeschöpft werden. Gemeinhin werden unzureichende Akzeptanz und der fehlende politische Konsens als die wichtigsten Hemmnisse für eine weitere, vor allem für eine verstärkte Kernenergienutzung angesehen. Die Herausbildung von sozialer Akzeptanz beziehungsweise Nichtakzeptanz sowie ihre Veränderungsmechanismen können von den Sozialwissenschaften nur teilweise erklärt werden. Ein sicherer und weitgehend störungsfreier Betrieb der Kernkraftwerke sowie anderer kerntechnischer Anlagen ist wohl als wichtiger Beitrag zur Verbesserung der Akzeptanz anzusehen. Dies schließt auch die Kernkraftwerke außerhalb der Bundesrepublik Deutschland ein und weist den Bemühungen um einen weltweit hohen Sicherheitsstandard, im Sinne einer internationalen Sicherheitspartnerschaft, eine große Bedeutung zu.

Weitere Maßnahmen, die für die zukünftige Nutzung der Kernenergie von Bedeutung sind, betreffen die Weiterführung und Realisierung von Endlagermöglichkeiten sowie die stetige Fortentwicklung der Sicherheitstechnik.

#### **5.1.3 Technische Potentiale der Minderung von Treibhausgasen durch Kernenergie**

Im folgenden werden die Möglichkeiten der Minderung von energiebedingten Treibhausgasemissionen durch den Einsatz von Kernenergie im Rahmen der Energieversorgung der Bundesrepublik Deutschland diskutiert. Im Vordergrund stehen dabei die Minderungsmöglichkeiten von CO<sub>2</sub>. Die anderen energiebedingten Treibhausgase werden nur im Zusammenhang mit der Reduktion der CO<sub>2</sub>-Emissionen betrachtet.

In einem ersten Schritt werden zunächst die technischen CO<sub>2</sub>-Minderungspotentiale ermittelt, worunter die unter Außerachtlassung von Wirtschaftlichkeitsaspekten und Hemmnissen technisch möglichen Reduktionen von CO<sub>2</sub>-Emissionen zu verstehen sind. In einem zweiten Schritt werden dann die Kosten der CO<sub>2</sub>-Minderungsmöglichkeiten durch Kernenergie abgeschätzt, um sie hinsichtlich ihrer Effizienz beurteilen zu können. Für die quantitative Abschätzung zukünftiger Treibhausgasreduktionsmöglichkeiten ist es erforderlich, von einer Bezugsbasis auszugehen, die die Entwicklung der Energienachfrage und ihre Deckung unter Status-quo-Annahmen beschreibt. Die anhand dieser Bezugsbasis quantifizierten Treibhausgasminderungspotentiale sind nicht als exakte Angaben oder gar als Prognose der tatsächlich sich einstellenden CO<sub>2</sub>-Reduktionen zu verstehen, sondern können nur eine quantitative Vorstellung der Größenordnung der möglichen CO<sub>2</sub>-Minderungen vermitteln.

#### **Elektrizitätserzeugung**

Der Energieträgereinsatz zur Deckung der Stromnachfrage betrug 3897 Petajoule (PJ) im Jahr 1987.

Rund 51,8 Prozent entfielen auf Stein- und Braunkohle, gut 8,7 Prozent auf Öl und Gas und 34,8 Prozent machten die CO<sub>2</sub>-freien Energieträger Kernenergie und Wasserkraft aus. Mit 231,6 Millionen Tonnen CO<sub>2</sub> hatte die Stromerzeugung einen Anteil von 32,4 Prozent an den gesamten energiebedingten CO<sub>2</sub>-Emissionen.

Als einzige, ohne lange Vorlaufzeiten realisierbare Maßnahme zur Minderung von CO<sub>2</sub>-Emissionen durch Kernenergie, kommt eine Erhöhung der Stromerzeugung in bestehenden Kernkraftwerken in Betracht. Begrenzt wird eine Strommehrerzeugung durch Auslastungserhöhung im wesentlichen durch die Lastcharakteristik der Stromnachfrage und die erreichbare Arbeitsausnutzung der Kernkraftwerke. Einer technisch möglichen Strommehrproduktion können gegebenenfalls auch die Kohleabnahmeverpflichtungen des Jahrhundertvertrages entgegenstehen. Die Zeit- und Arbeitsverfügbarkeit der LWR-Kernkraftwerke konnte in den achtziger Jahren deutlich erhöht werden. Die Zeitverfügbarkeit lag dabei in dem Zeitraum von 1984 und 1988 zwischen 83,6 und 89,2 %. Für den Fall, daß die bestehenden Kernkraftwerke einen möglichst großen Beitrag zur Minderung von CO<sub>2</sub>-Emissionen leisten sollen, ist es aufgrund der bisherigen Betriebserfahrungen möglich, sie mit einer Arbeitsausnutzung von bis zu 85 Prozent zu betreiben, wenn eine gemeinsame, an der Minderung von CO<sub>2</sub>-Emissionen orientierte Einsatzplanung aller Kernkraftwerke erfolgt und auf einen Stretch-Out-Betrieb verzichtet wird. Orientiert man sich an den Arbeitsausnutzungen der Jahre 1987 und 1988, so kann man für die Abschätzung des sofort realisierbaren CO<sub>2</sub>-Minderungspotentials eine Erhöhung der Arbeitsausnutzung um 6 bis 8 %-Punkte ansetzen. Bei Ausschöpfung der vollen Stromerzeugungsmöglichkeit der bestehenden Kernkraftwerkskapazität könnten in den nächsten Jahren 21 bis 25 TWh Strom pro Jahr mehr erzeugt werden als 1989, womit CO<sub>2</sub>-Emissionen in Höhe von 18 bis 27 Millionen t/a aus fossilen Kraftwerken vermieden werden könnten.

Betrachtet man weiter in der Zukunft liegende Zeitpunkte, so ermöglicht ein verstärkter Zubau von Kernkraftwerken die Minderung von CO<sub>2</sub>-Emissionen aus der Stromerzeugung. Für die Abschätzung des technisch möglichen CO<sub>2</sub>-Minderungspotentials im Bezugszeitpunkt 2005 wird von einem gegenüber dem Referenzfall verstärkten Ausbau der Kernenergie ausgegangen, der den im Zeitraum bis 2005 unterstellten Zubau neuer Braun- beziehungsweise Steinkohlekraftwerke ganz oder teilweise ersetzen soll, wobei der Ausbau der Kernkraftwerkskapazität auf 1 beziehungsweise 2 Kernkraftwerke je Jahr, beginnend im Jahre 1997, begrenzt ist. Die Kernkraftwerke werden dabei mit der Auslastung der ersetzten fossilen Anlagen betrieben. In einer weiteren Variante wird dann noch ein CO<sub>2</sub>-emissionsminimierender Betrieb des gesamten Kraftwerksparks unterstellt, der die Stromerzeugung aus Kernkraftwerken, soweit betriebstechnisch und vom Lastgang der Stromnachfrage möglich, maximiert. In Tabelle 12 sind die sich so ergebenden technischen CO<sub>2</sub>-Minderungspotentiale zusammengestellt.

Bei der Beschränkung des Zubaus neuer Kernkraftwerke auf eine Anlage pro Jahr beginnend 1997 und

einer Verwendung der dadurch gegenüber der Referenzentwicklung möglichen Strommehrerzeugung in Kernkraftwerken als Ersatz für eine Stromerzeugung in Braunkohlekraftwerken ergibt sich je nachdem, ob die Kernkraftwerke normal ausgelastet werden oder ein CO<sub>2</sub>-Minderungspotential in der Größenordnung von 50 bis 88 Millionen Tonnen CO<sub>2</sub> im Jahr 2005. Wird unter sonst gleichen Bedingungen nicht Braunkohle, sondern Steinkohlekraftwerkskapazität und Steinkohlestrom ersetzt, so liegt das Minderungspotential im Bereich von 24 bis 95 Millionen Tonnen CO<sub>2</sub>/a.

Wird anstelle des im Referenzfall angenommenen Zubaus von Stein- und Braunkohlekraftwerken (Ersatz- und Erweiterungskapazitäten) der Zubau von Kernkraftwerken (max. 2 Anlagen ab 1997) unterstellt, so ergäbe sich im Jahr 2005 eine Kernkraftwerksleistung von rund 45000 MW<sub>e1</sub>. Bei einem an der Vermeidung klimarelevanter Spurengasemissionen orientierten Betrieb des gesamten Kraftwerksparks ließe sich eine CO<sub>2</sub>-Minderung gegenüber dem Referenzfall von rund 145 Millionen Tonnen CO<sub>2</sub>/a erreichen. Dies ist die Größenordnung des maximal technisch möglichen CO<sub>2</sub>-Minderungspotentials durch Kernenergie in der Stromerzeugung im Jahr 2005. Es entspricht rund 63 Prozent der CO<sub>2</sub>-Emissionen der Stromerzeugung im Jahr 1987.

Die zuvor erläuterten technischen CO<sub>2</sub>-Minderungspotentiale sind anhand der unterstellten Referenzentwicklung ermittelt worden. Die Zugrundelegung anderer Bezugsentwicklungen würde natürlich zu zahlenmäßig anderen, höheren beziehungsweise niedrigeren Potentialwerten führen, die Größenordnung des technischen Minderungspotentials aber nicht verändern. Eine Ausschöpfung der maximalen technischen Potentiale würde erhebliche Anstrengungen voraussetzen und wäre nur möglich, wenn keinerlei Verzögerungen beim Bau der Kernkraftwerke auftreten.

### Fernwärmeversorgung

Im Bereich der Fernwärmeversorgung existieren zwei technische Varianten der CO<sub>2</sub>-Minderung durch nukleare Wärme. Einmal die Substitution von fossil erzeugter Fernwärme durch Wärme, die aus großen Kernkraftwerken ausgekoppelt (Kernkraftwerke mit Kraft-Wärme-Kopplung (KWK)) und in bestehende Fernwärmenetze eingespeist wird und zum anderen durch Wärme, die in kleinen Kernheizwerken erzeugt wird. Die CO<sub>2</sub>-Emissionen, die der Fernwärmeerzeugung zuzurechnen sind, betragen im Jahr 1987 etwa 14 Millionen Tonnen CO<sub>2</sub>, also knapp 2 Prozent der CO<sub>2</sub>-Emissionen in der Bundesrepublik Deutschland (ohne ehemalige DDR). Betrachtet man zusätzlich noch den Brennstoffeinsatz zur Koppelstromproduktion in Heizkraftwerken, so beliefen sich die CO<sub>2</sub>-Emissionen aus Heizwerken und Heizkraftwerken der öffentlichen Fernwärmeversorgung auf 27,5 Millionen Tonnen.

Die Fernwärmeauskopplung aus bestehenden Kernkraftwerken ist technisch möglich, sie kann aber wegen der zum Bau der Auskopplungseinrichtungen und Fernwärmetransportleitungen notwendigen Zeit,

genau wie die Heizreaktoren keinen kurzfristig realisierbaren Beitrag zur CO<sub>2</sub>-Minderung leisten. Für die Abschätzung des Minderungspotentials im Jahr 2005 wird davon ausgegangen, daß die Leistung der Fernwärmeinspeisung aus Kernkraftwerken maximal 60 Prozent der Höchstlast des entsprechenden Fernwärmenetzes beträgt. Dies bedeutet, daß die Deckung der Spitzenlast und die Reservehaltung weiterhin von den verbleibenden fossilen Heiz- beziehungsweise Heizkraftwerken übernommen wird. Die in Kernenergieanlagen erzeugte Wärme ersetzt damit im wesentlichen fossile Fernwärmeerzeugung in Grundlastanlagen.

Für die Auskopplung von Fernwärme aus Kernkraftwerken (nukleare KWK) ergibt sich ein maximales technisches CO<sub>2</sub>-Minderungspotential von rund 5 Millionen Tonnen CO<sub>2</sub> im Jahr 2005, wenn man nur den der Fernwärmeerzeugung zuzurechnenden fossilen Brennstoffeinsatz zugrunde legt. Wird auch die Stromerzeugung der fossilen KW-Kopplungs-Anlagen substituiert und die entsprechende Strommenge CO<sub>2</sub>-frei erzeugt, dann liegt die technisch mögliche CO<sub>2</sub>-Minderung bei fast 13 Millionen Tonnen CO<sub>2</sub>/a. Alternativ beziehungsweise ergänzend zur Auskopplung von Fernwärme aus Kernkraftwerken können Kernheizwerke zur Substitution fossil erzeugter Fernwärme beitragen. Ihr technisches Minderungspotential ergibt zu 6,6 Millionen Tonnen CO<sub>2</sub> im Jahr 2005, wenn man nur den Brennstoffeinsatz, der der Fernwärmeerzeugung zuzurechnen ist, berücksichtigt. Dagegen würden 16,5 Millionen Tonnen CO<sub>2</sub>/a nicht emittiert, wenn die Strom- und Wärmeerzeugung der Heizkraftwerke CO<sub>2</sub>-frei ersetzt wird.

Die aus technischer Sicht maximale CO<sub>2</sub>-Reduktion durch Kernenergie im Bereich der Fernwärmeerzeugung liegt für das Jahr 2005 bei 7 beziehungsweise 16,5 Millionen Tonnen CO<sub>2</sub>/a. Bezogen auf die gesamten energiebedingten CO<sub>2</sub>-Emissionen des Jahres 1987 sind dies ca. 1 bis 2 Prozent.

### Veredelung fossiler Energie

Flüssige und gasförmige Kohlenwasserstoffe sind aufgrund ihres spezifischen Energieinhalts, ihrer guten Transportier- und Speicherbarkeit die derzeit wichtigsten Energieträger. Kohle hingegen kann eigentlich nur auf die letzte dieser Eigenschaften verweisen. Es liegt also nahe, den Primärenergieträger Kohle, einen „Kohlenwasserstoff“ mit einem H/C-Verhältnis von nur 0,8, mit Wasserstoff anzureichern und ihn in einen gasförmigen oder flüssigen Kohlenwasserstoff umzuwandeln, d. h. ihn zu veredeln. Die für diese Veredelung notwendige Energie wird bei den konventionellen (autothermen) Kohleveredlungsverfahren durch eine Teilverbrennung der Kohle selbst aufgebracht. Sie kann aber auch durch einen Hochtemperaturreaktor bereitgestellt werden (allotherme Kohleveredlung). Die nukleare Veredelung von Stein- beziehungsweise Braunkohle ermöglicht die Herstellung von Stadtgas, Wasserstoff, synthetischem Erdgas, Methanol sowie Benzin. Weiterhin ist noch die Wasserstoffherzeugung aus Erdgas mittels nuklearer Wärme als Veredelung fossiler Energie zu betrachten. Der verfahrensspezifische Vergleich der CO<sub>2</sub>-Emissionen zeigt,

daß eine nennenswerte CO<sub>2</sub>-Reduktion nur dann zu erreichen ist, wenn die bei der Umwandlung anfallenden CO<sub>2</sub>-Mengen deponiert werden können.

Den Verfahren der nuklearen Kohleveredlung kann unter Klima- beziehungsweise CO<sub>2</sub>-Vermeidungsgesichtspunkten gegebenenfalls eine Bedeutung zukommen, wenn aus energiepolitischen Gründen auch weiterhin eine gewisse Menge an heimischer Kohle gefördert und verwendet werden soll. Hier eröffnet die Methanol- beziehungsweise Benzinerzeugung aus Kohle mittels nuklearer Wärme die Möglichkeit, ölstämmige Kraftstoffe im Verkehrsbereich zu ersetzen und zur Reduktion der CO<sub>2</sub>-Emissionen durch Nichtverstromung dieser Kohlemengen beizutragen, wenn der Strom anderweitig CO<sub>2</sub>-frei erzeugt werden kann.

### Industrielle Prozeßdampf- und Prozeßwärmeerzeugung

Die Erzeugung von Prozeßdampf und Prozeßwärme für die Industrie mittels Kernreaktoren ist eine weitere Möglichkeit, über eine Substitution fossiler Energien zur CO<sub>2</sub>-Minderung beizutragen. Der HTR-Modulreaktor mit einer Blockgröße von 150 bis 200 MWth kann hier eingesetzt werden. Die Analyse des industriellen Brennstoffverbrauches, gegliedert nach Sektoren, Verwendungszwecken und Temperaturbereichen ergibt, unter der Berücksichtigung einer Mindesthöhe des Bedarfs an Prozeßdampf beziehungsweise Prozeßwärme je Industriestandort, ein technisches CO<sub>2</sub>-Minderungspotential von 30 Millionen Tonnen CO<sub>2</sub>/a für den Bereich der Prozeßdampfversorgung. Berücksichtigt man darüber hinaus auch noch den Bereich der Prozeßwärmeerzeugung, so erhöht sich das technische Minderungspotential auf rund 35 Millionen Tonnen CO<sub>2</sub>/a. Dies entspricht rund 5 Prozent der energiebedingten CO<sub>2</sub>-Gesamtemissionen des Jahres 1987.

### Wasserstoffherzeugung aus Elektrolyse

Die Wasserstoffherzeugung aus Elektrolyse mit Kernenergiestrom ist CO<sub>2</sub>-frei. Das prinzipiell vorhandene CO<sub>2</sub>-Minderungspotential umfaßt den gesamten Einsatzbereich von festen, flüssigen und gasförmigen Endenergieträgern, die fossilen Ursprungs sind. Ein technisches CO<sub>2</sub>-Minderungspotential für das Bezugsjahr 2005 ist in den Untersuchungen nicht quantifiziert worden.

In Tabelle 12 sind die zuvor diskutierten technischen CO<sub>2</sub>-Reduktionspotentiale der Kernenergie für den Bezugszeitpunkt 2005 zusammengefaßt aufgeführt. Die unterschiedlichen Potentialangaben bei einzelnen Anwendungsbereichen der Kernenergie sind dabei zum Teil als alternative Angaben zu verstehen, die nicht zu einem Gesamtpotential aufsummiert werden können.

Weiterhin ist anzumerken, daß eine Ausschöpfung aller maximalen technischen Einzelpotentiale bis zum Jahr 2005 unter anderem aufgrund industrieller Fertigungskapazitätsgrenzen nicht möglich sein dürfte.

**Technisches CO<sub>2</sub>-Minderungspotential der Kernenergie im Jahr 2005  
sowie verbundene Minderung anderer klimarelevanter Spurengase**

Bereich / Maßnahme	technisches Spurengasminderungspotential			
	Minderung in Mio. t/a		Minderung in kt/a	
	CO <sub>2</sub>	NO <sub>x</sub>	NM VOC	CH <sub>4</sub> <sup>1)</sup>
<b>Stromerzeugung</b>				
○ Zubau 1 KKW/a (maximal) Ersatz von Braunkohle normaler/CO <sub>2</sub> -minimierender Betrieb	50 bis 88	36 bis 64	0,4 bis 0,8	71 bis 126
○ Zubau 1 KKW/a (maximal) Ersatz von Steinkohle normaler/CO <sub>2</sub> -minimierender Betrieb	24 bis 95	17 bis 47	0,3 bis 0,7	134 bis 362
○ Zubau 2 KKW/a (maximal) Ersatz von Braunkohle normaler/CO <sub>2</sub> -minimierender Betrieb	88 bis 149	63 bis 107	0,9 bis 1,5	214 bis 450
○ Zubau 2 KKW/a (maximal) Ersatz von Steinkohle normaler/CO <sub>2</sub> -minimierender Betrieb	63 bis 143	45 bis 102	0,7 bis 1,5	347 bis 554
<b>Öffentliche Nah- und Fernwärmeversorgung</b>				
○ Auskopplung aus KKW (LWR) . . . . .	5 bis 13	5 bis 13	0,2 bis 0,5	22 bis 54
○ Einsatz von Kernkraftheizwerken . . .	7 bis 16,5	7 bis 16	0,2 bis 0,5	23 bis 58
<b>Veredlung fossiler Energie</b>				
○ Herstellung von SNG, H <sub>2</sub> , Methanol und Stadtgas . . . . .	k. A.	k. A.	k. A.	k. A.
<b>Industrielle Prozeßdampf- und Prozeßwärmeerzeugung</b>				
○ Prozeßdampf . . . . .	30	46	0,7	83
○ Prozeßwärme . . . . .	5	5	0,1	11
<b>Werkstoffherstellung (Elektrolyse)</b>				
○ Wasserstoff als Substitut für Kohle, Öl, Gas . . . . .	k. A.	k. A.	k. A.	k. A.

1) einschließlich der vorgelagerten Stufen

Die Ausweitung der Kernenergienutzung würde auch einen wesentlichen Beitrag zur Reduktion anderer klimarelevanter Spurengase beziehungsweise ihrer Vorläufersubstanzen leisten. Die entsprechenden Werte sind in Tabelle 12 aufgeführt. Maximal könnte bei den NO<sub>x</sub>-Emissionen eine Minderung um 182 Kilotonnen, bei den NMVOC-Emissionen eine Minderung um 3,3 Kilotonnen sowie bei den CH<sub>4</sub>-Emissionen (einschließlich der vorgelagerten Stufen) eine Minderung um 760 Kilotonnen erreicht werden.

Abschließend sei noch eine Anmerkung zu den CO<sub>2</sub>-Minderungspotentialen durch Kernenergie in der fernen Zukunft (Bezugsjahr 2050) gemacht. Generell gilt, daß über den Zeitraum von 60 Jahren grund-

legende Änderungen des Energieversorgungssystems denkbar und wahrscheinlich sind, da in diesem Zeitraum alle heute existierenden Energiewandlungs-, -transport-, -verteilungs- und -anwendungssysteme wegen der Erreichung ihrer technischen Lebensdauer zu ersetzen sind. Dies impliziert weitgehende technische CO<sub>2</sub>-Minderungspotentiale sowohl durch aus Kernenergie erzeugtem Strom, die Nutzung der Kernenergie zur Fern- und Nahwärme- beziehungsweise Prozeßdampf- und Prozeßwärmeerzeugung, durch den Einsatz der Kernenergie zur Veredlung fossiler Energieträger und durch Anwendung von elektrolytisch erzeugtem Wasserstoff. Eine Quantifizierung von CO<sub>2</sub>-Minderungspotentialen für diesen weit in der Zukunft liegenden Zeitpunkt ist nicht möglich.

### 5.1.4 Kosten und Aufwand der Spurengasreduktion durch Kernenergie

Für die Beurteilung und Einordnung von Treibhausgasminderungsmöglichkeiten sind neben dem Minderungspotential der Aufwand beziehungsweise die Kosten, die mit der Durchführung der Minderungsmaßnahmen verbunden sind, von besonderer Bedeutung. Im folgenden werden für die zuvor quantifizierten CO<sub>2</sub>-Minderungspotentiale durch Kernenergie, die mit den einzelnen Maßnahmen verbundenen Minderungskosten abgeschätzt, um eine Beurteilung ihrer ökonomischen Effizienz zu ermöglichen. Als Kenngröße werden dabei die spezifischen CO<sub>2</sub>-Minderungskosten verwendet, die die Kosten bezeichnen, die entstehen, um die Emission einer Tonne CO<sub>2</sub> zu vermeiden. Die später genannten spezifischen Minderungskosten können nur Orientierungswerte darstellen, da die Kosten- und Preisentwicklungen der substituierten fossilen Brennstoffe beziehungsweise ihre Umwandlungs- und Nutzungstechniken sowie die Kosten der Kernenergie, die in ihre Ermittlung einfließen, mit Unsicherheiten behaftet sind. Es ergeben sich in einzelnen Fällen auch negative spezifische CO<sub>2</sub>-Minderungskosten. Diese bedeuten, daß im Rahmen der Annahmen diese Maßnahmen auch ohne Bewertung ihrer CO<sub>2</sub>-Minderung ökonomisch sinnvoll wäre, da sie die Energie kostengünstiger bereitstellt.

#### Kosten und Wirtschaftlichkeitsaspekte der Kernenergie

Die Kosten und damit die Wirtschaftlichkeit der Energieerzeugung mittels Kernenergie werden im wesentlichen bestimmt durch die Anlagekosten, die Brennstoffkreislaufkosten, die die Kosten der Entsorgung enthalten und die sonstigen Betriebs- beziehungsweise Wartungskosten des Kraftwerks. Durch den Bau und Betrieb einer großen Zahl von Kernkraftwerken sowie von Anlagen des Brennstoffkreislaufs, angefangen von der Urangewinnung über die Konversion, die Anreicherung, die Brennelementfertigung bis zur Wiederaufarbeitung, liegen für wesentliche Kostenelemente der nuklearen Energieerzeugung umfangreiche reale Kostendaten vor. Für neue noch nicht realisierte Reaktorkonzepte und für die Endlagerung nuklearer Abfälle stehen nur Kostenabschätzungen zur Verfügung, die durch einen höheren Unsicherheitsfaktor gekennzeichnet sind.

Die bei der modellhaften Wirtschaftlichkeitsrechnung verwendeten Kostendaten für Heizreaktoren und Hochtemperaturreaktoren unterstellen, daß es sich um Serienanlagen handelt, die gegenüber einer Erstanlage geringere Investitionskosten aufweisen. Diese Annahme beruht auf der Fertigung größerer Stückzahlen, die notwendig wäre, wenn auch nur ein Teil der technischen Potentiale ausgeschöpft werden soll.

#### Leichtwasserreaktoren

Die spezifischen Anlagekosten von Leichtwasserreaktoren konnten bis zu Beginn der siebziger Jahre durch

das Anwachsen der Anlagegröße (bis auf 1300 MW<sub>el</sub>) zunächst gesenkt werden. Durch aufwendigere Genehmigungsverfahren, Konzeptänderungen, Modifikationen während der Bauphase verlängerten sich die Bauzeiten und die spezifischen Anlagekosten der Kernkraftwerke in der Bundesrepublik Deutschland und stiegen ab Mitte der 70er Jahre stark an. Erst bei den drei 1988/89 fertiggestellten Konvoi-Anlagen, bei welchen Standardisierungen und eine Umlage von nicht projektspezifischen Aufwendungen auf mehrere Anlagen sowie ein beschleunigtes Genehmigungsverfahren möglich waren, konnte dieser Kostenanstieg gebremst werden. Die spezifischen Kosten einer Konvoi-Anlage mit 1258 MW<sub>el</sub>-Nettoleistung lagen bei 3340 ± 160 DM/kW<sub>el</sub> (ohne Erstkern, Bauzinsen und Steuern).

Aus den bei der Errichtung von Konvoi-Anlagen gemachten Erfahrungen kann, nach Angaben von Herstellern und Betreibern, erwartet werden, daß durch optimierte Planungs-, Bau- und Montageabläufe, durch weitere technische Verbesserungen, wie zum Beispiel fortschrittliche elektro- und leittechnische Systeme sowie technische Systemänderungen, wie Erhöhung der Loop-Leistung und kompaktere Anordnung, die Anlagekosten für ein 1300 MW<sub>el</sub>-Kraftwerk noch um ca. 10 bis 15 Prozent gesenkt werden können. Eine weitere Senkung der spezifischen Anlagekosten von 5 bis 10 Prozent kann bei Doppelblockanlagen (2 x 1300 MW<sub>el</sub> an einem Standort) sowie durch eine Leistungserhöhung auf ca. 1450 MW<sub>el</sub> erreicht werden. Für die nahe Zukunft dürfte deshalb die Annahme einer Senkung der Anlagekosten bei großen Leichtwasserreaktoren in der Bundesrepublik Deutschland (ohne ehemalige DDR) um 10 Prozent auf rund 3000 DM/kW<sub>el</sub> und für die fernere Zukunft auf rund 2680 DM/kW<sub>el</sub> realistisch sein, sofern LWR-Kraftwerke in Zukunft in einem gewissen Umfang zugebaut werden. Die geschätzten Kosten beinhalten die heute ins Auge gefaßte sicherheitstechnische Weiterentwicklung der Leichtwasserreaktoren, nicht aber die eventuell höheren Kosten von aufwendigen Änderungen des Sicherheitskonzepts, wie zum Beispiel die Ausstattung mit einem kernschmelzfesten Containment.

Die Brennstoffkreislaufkosten<sup>1)</sup> umfassen die Kosten der Brennstoffversorgung und der Entsorgung. Die wesentlichen Stufen sind Uranerzgewinnung, Konversion von Urankonzentrat, Anreicherung, Brennelementherstellung, Zwischenlagerung abgebrannter Brennelemente, Wiederaufarbeitung und Plutoniumrückführung sowie Endlagerung der dabei entstehenden Abfälle oder direkte Endlagerung der konditionierten Brennelemente. Dazu kommen Transporte zwischen den einzelnen Stufen. Die Preise für Natururan, Konversion, Trennarbeit usw. hängen von der jeweiligen Marktsituation, also von Angebot und Nachfrage ab. Langfristig ist jedoch nur beim Natururan mit einem realen Preisanstieg zu rechnen. Die Entsorgung abgebrannter Brennelemente kann auf zwei Wege erfolgen. Einmal durch direkte Endlagerung (nach einer Konditionierung) oder durch Wieder-

<sup>1)</sup> Hier wird der Begriff verwendet, obwohl es sich auch bei einer Wiederaufbereitung nicht im strengen Sinne um einen Kreislauf handelt.



aufarbeitung und Endlagerung der dabei separierten Abfallstoffe. Untersuchung zur Wirtschaftlichkeit der beiden Entsorgungswege zeigen, daß die direkte Endlagerung mit Kosten zwischen 900 und 1220 DM/kg Schwermetall (SM) kostengünstiger als die Wiederaufarbeitung mit Endlagerung (Kosten 1990 – 2500 DM/kg SM) ist. Um bei der Abschätzung der Brennstoffkreislaufkosten auf der sicheren Seite zu liegen, werden die Entsorgungskosten mit 4000 DM/kg SM angesetzt.

Die gesamten Stromerzeugungskosten für LWR, einschließlich der Abrißkosten, errechnen sich bei der gewählten Betrachtungsweise (Wirtschaftlichkeitsrechnung gemäß Analyseraster in realen Preisen und unter Zugrundelegung einer technischen Nutzungsdauer von 35 Jahren) für eine Auslastung von 6500 h/a (Grundlaststromerzeugung) für eine Anlage mit spezifischen Anlagekosten von 3000 DM/kW<sub>el</sub> zu 7,6 DPF/kWh<sub>el</sub>.

### HTR, Schneller Brüter und Heizreaktoren

Von den herstellenden Firmen und den Betreibern künftiger Hochtemperatur-Reaktoranlagen werden für den HTR-500 direkte Anlagekosten von 3500 DM je kW<sub>el</sub> angegeben. Diese Kostenhöhe entspricht in etwa den heutigen Anlagekosten von großen Leichtwasser-Reaktoren. Für die MODUL-Anlagen mit je 4 MODUL-Reaktoren wurden von den Herstellern und den Betreibern direkte Anlagekosten von ca. 5200 DM/kW<sub>el</sub> ermittelt. Mit diesen Anlagekosten ergeben sich Stromerzeugungskosten für den HTR-500 von 8,3 Dpf/kWh<sub>el</sub> beziehungsweise für den HTR-4-MODUL-Reaktor von 9,6 Dpf/kW<sub>el</sub>. Eine nennenswerte Kostenreduzierung wird in der Zukunft aus verschiedenen Gründen für möglich gehalten. Einmal wäre durch die Herstellung von Serien, vor allen Dingen bei kleinen Reaktoren, eine Kostenreduktion möglich. Darüber hinaus wird erwartet, daß die Einführung von Siliziumkarbid-geschützten Brennelementen die Anlagen wesentlich vereinfachen wird und es ermöglicht, die Leistung pro Reaktoreinheit anzuheben. Es wird abgeschätzt, daß die Anlagekosten etwa um 20 bis 30 Prozent gegenüber dem heutigen Stand gesenkt werden können.

Brüterkraftwerke sind bisher wirtschaftlich mit den LWR noch nicht konkurrenzfähig. Senkungen der Anlagekosten werden u. a. durch kompaktere Bauweise und passiv funktionierende Nachtwärmeabfuhr, die der Betriebskosten u. a. durch noch längere Standzeiten wichtiger Komponenten, insbesondere der Brennelemente, gesehen. Darüber hinaus werden der Bau einer größeren Anzahl von Anlagen und eine längerfristig zu erwartende Verteuerung des Natururans die Wettbewerbsfähigkeit der Brüter verbessern.

Obwohl Heizreaktoren verglichen mit großen Kernkraftwerken sehr niedrige thermische Leistungen aufweisen, sollen durch erhebliche Vereinfachungen der Anlagen die spezifischen Investitionskosten (bezogen auf thermische Leistung) niedrig gehalten werden können. Die in der Literatur und von Herstellern gemachten Angaben zu den spezifischen Investitionskosten liegen je nach Konzept und Leistungsgröße zwi-

schen 750 und 2250 DM/kW<sub>th</sub>. Damit errechnen sich die Wärmeerzeugungskosten frei Heizwerk bei einer Auslastung von 4000 h/a zu 3,3 bis 10 Pf/kWh<sub>th</sub>.

### Kosten der CO<sub>2</sub>-Minderung durch Kernenergie

#### Stromerzeugung

Die Minderung der CO<sub>2</sub>-Emissionen der Stromerzeugung durch einen weiteren Ausbau der Kernenergie anstelle einer Stromerzeugung in Braun- und Steinkohlekraftwerken ist, im Rahmen der zugrundeliegenden Daten, nicht mit zusätzlichen Kosten verbunden. Es ergeben sich für die hier bestehenden technischen CO<sub>2</sub>-Reduktionspotentiale negative spezifische CO<sub>2</sub>-Minderungskosten (vgl. Tab. 13), das heißt, der Ausbau der Kernenergie reduziert auch den Gesamtaufwand der Stromerzeugung. Im Falle einer Substitution von Strom aus Braunkohle beziehungsweise importierter Steinkohle liegen die spezifischen Minderungskosten in einem Bereich von –15 bis –1 DM/CO<sub>2</sub>.

Unterstellt man eine Substitution von heimischer Steinkohle, so lassen sich aufgrund der hohen Kosten rechnerisch besonders günstige CO<sub>2</sub>-Minderungskosten ermitteln. Dabei ist allerdings zu berücksichtigen, daß eine energiepolitisch begründete Verstromung heimischer Steinkohle Kosten verursacht, die der Versorgungssicherheit sowie den Bereichen Sozial-, Struktur- und Arbeitsmarktpolitik zuzurechnen sind. Entsprechende Kosteneinsparungen im Energiebereich (hier bei der Stromerzeugung) ließen sich auch bei einer Substitution heimischer Steinkohle durch Importkohle erreichen, allerdings ohne eine gleichzeitige Minderung der CO<sub>2</sub>-Emissionen.

#### Fernwärmeezeugung

Zur Abschätzung der CO<sub>2</sub>-Minderungskosten bei Einsatz der Kernenergie zur Fernwärmeverversorgung, sind die Kosten der Fernwärmeezeugung in nuklearen Anlagen mit denen der fossilen Wärmeerzeugung zu vergleichen. Als Vergleichssysteme dienen dabei fossile Heizkraftwerke (KWK), die im Grundlastbereich arbeiten. Bei den modellhaft durchzuführenden Wirtschaftlichkeitsrechnungen treten zwei grundsätzliche Schwierigkeiten auf. Einmal ist es, wie bei allen Koppelproduktionsanlagen, auch bei Heizkraftwerken nicht möglich, die entstehenden Kosten eindeutig den beiden Produkten Strom und Wärme zuzuordnen. Die in der Praxis verwendeten Verfahren führen zu teilweise erheblich abweichenden Ergebnissen. Zweitens ist das Spektrum der als Referenzsysteme in Frage kommenden KWK-Anlagen sehr groß und die einzelnen Anlagentypen können in bezug auf ihre Stromkennziffer (Verhältnis von Strom- zu Wärmeerzeugung) sehr unterschiedlich ausgelegt sein. Beides erschwert repräsentative oder gar allgemeingültige Wirtschaftlichkeitsvergleiche. Vor diesem Hintergrund können die abgeschätzten CO<sub>2</sub>-Minderungskosten nur eine erste orientierende Aufgabe haben.

Die Kosten der Fernwärme, die durch Auskopplung aus großen Kernkraftwerken bereitgestellt wird, set-

Tabelle 13

Technisches CO<sub>2</sub>-Minderungspotential und spezifische Minderungskosten der Kernenergie im Jahr 2005

Bereich / Maßnahme	technisches CO <sub>2</sub> -Minderungspotential [Mio. t CO <sub>2</sub> /a]	spezielle Minderungskosten [Mio. t CO <sub>2</sub> ]
<b>Stromerzeugung</b>		
○ Zubau 1 KKW/a (maximal) Ersatz von Braunkohle normaler/CO <sub>2</sub> -minimierender Betrieb .....	50 bis 88	– 5 bis – 10
○ Zubau 1 KKW/a (maximal) Ersatz von Steinkohle normaler/CO <sub>2</sub> -minimierender Betrieb .....	24 bis 95	– 1 bis – 15 (– 61 bis – 66) <sup>1)</sup>
○ Zubau 2 KKW/a (maximal) Ersatz von Braunkohle normaler/CO <sub>2</sub> -minimierender Betrieb .....	88 bis 149	3,5 bis –13
○ Zubau 2 KKW/a (maximal) Ersatz von Steinkohle normaler/CO <sub>2</sub> -minimierender Betrieb .....	63 bis 143	– 1 bis – 13 (– 59 bis – 66) <sup>1)</sup>
<b>Öffentliche Nah- und Fernwärmeverordnung</b>		
○ Auskopplung aus KKW (LWR) .....	5 bis 13	– 50 bis +750 (–145 bis +645) <sup>1)</sup>
○ Einsatz von Kernkraftheizwerken .....	7 bis 16,5	–190 bis +140 (–160 bis +140) <sup>1)</sup>
<b>Veredelung fossiler Energie</b>		
○ Herstellung von SNG, H <sub>2</sub> , Methanol und Stadtgas	k. A.	300 bis 1 100
<b>Industrielle Prozeßdampf- und Prozeßwärmeerzeugung</b>		
○ Prozeßdampf .....	30	bis +20
○ Prozeßwärme .....	5	
<b>Werkstoffherzeugung (Elektrolyse)</b>		
○ Wasserstoff als Substitut für Kohle, Öl, Gas .....	k. A.	300 bis 530 <sup>2)</sup>

<sup>1)</sup> Werte gelten nur für heimische Steinkohle

<sup>2)</sup> nur aus Basis der H<sub>2</sub>-Herstellungskosten ermittelt

zen sich zusammen aus den Kosten für die Auskopplungseinrichtungen am Kraftwerk und die Investitionen für die Transportleitung zum Fernwärmeverteilungsnetz. Des weiteren kommen die Pumpkosten, Wärmetransportverlustkosten und die Verrechnung der Stromeinbuße für die Wärmeauskopplung hinzu. Die spezifischen CO<sub>2</sub>-Minderungskosten für die Fernwärmeerzeugung in großen Kernkraftwerken spannen aufgrund der unterschiedlichen Transportentfernungen und je nach Referenzsystem einen weiten Bereich von rund –50 bis +750 DM/t CO<sub>2</sub> auf, wenn man bei der Kohle von den Kosten der Importkohle ausgeht. Von dem gesamten technischen CO<sub>2</sub>-Minderungspotential ließe sich nur ein kleiner Teil, das heißt 0,5 – 1,5 Millionen Tonnen CO<sub>2</sub>/a im Bezugszeitpunkt 2005 wirtschaftlich, das heißt ohne zusätzliche Kosten, vermeiden. Für die Kernheizwerke liegen die spezifischen CO<sub>2</sub>-Minderungskosten, die sich im Rahmen der getroffenen Annahmen zur Wirtschaftlich-

keitsrechnung ergeben, zwischen –90 bis +140 DM/t CO<sub>2</sub> bei Rechnung gegen Importkohle. Das im Jahr 2005 gegebenenfalls wirtschaftlich erschließbare CO<sub>2</sub>-Minderungspotential liegt zwischen 0,8 bis 3,5 Millionen Tonnen CO<sub>2</sub>/a.

### Veredelung fossiler Energie

Wie vorher bereits erwähnt, sind nennenswerte CO<sub>2</sub>-Minderungen durch flüssige oder gasförmige Energieträger, die aus fossilen Primärenergieträgern mittels nuklearer Wärme hergestellt werden, nur erreichbar, wenn das bei der Umwandlung anfallende CO<sub>2</sub> deponiert wird. Die spezifischen CO<sub>2</sub>-Minderungskosten (ermittelt anhand der Erzeugungskosten für das erste Betriebsjahr incl. der Kosten für die CO<sub>2</sub>-Deponierung) liegen zwischen 300 und 1100 DM/t CO<sub>2</sub> und

sind damit deutlich höher als bei den zuvor diskutierten CO<sub>2</sub>-Reduktionsmöglichkeiten mittels Kernenergie.

### Prozeßdampf- und Prozeßwärmeerzeugung

Von dem zuvor ausgewiesenen technischen CO<sub>2</sub>-Minderungspotential der Kernenergie im Bereich der Prozeßdampf- und Prozeßwärmeerzeugung in der Industrie in Höhe von 35 Millionen Tonnen CO<sub>2</sub>/a ließen sich bei der unterstellten Energiepreisentwicklung im Jahr 2005 rund 24 Millionen Tonnen CO<sub>2</sub>/a, also etwa 70 Prozent des technischen Potentials, ohne zusätzliche Kosten erschließen. Für die darüber hinausgehenden CO<sub>2</sub>-Reduktionen liegen die spezifischen CO<sub>2</sub>-Minderungskosten zwischen 12 und 20 DM/t CO<sub>2</sub>, je nachdem ob Heizöl oder Erdgas substituiert wird.

### Wasserstoffherzeugung (Elektrolyse)

Die Erzeugung von Wasserstoff mittels Elektrolyse aus Kernenergiestrom führt zu Wasserstoffgestehungskosten, die auch im Jahr 2005 deutlich über denen von Heizöl und Erdgas liegen. Daraus ergeben sich allein auf der Basis der H<sub>2</sub>-Herstellkosten spezifische Minderungskosten von 300 DM/t CO<sub>2</sub> bei einer Substitution von Heizöl und 530 DM/t CO<sub>2</sub> bei Erdgas.

Für eine aus gesellschaftlicher Sicht umfassende Ermittlung von Treibhausgasminderungskosten verschiedener Techniken und Maßnahmen wäre eine Mitberücksichtigung der jeweiligen externen Kosten erforderlich. Auf die Probleme der Ermittlung externer Kosten wird in Studienkomplex F eingegangen. In einer neueren Untersuchung von Friedrich (1985) wird für die gegenwärtig quantifizierbaren externen Kosten einer Stromerzeugung auf Basis fossiler, nuklearer und regenerativer Energien eine Bandbreite von 0,2-1,34 Pf/kWh<sub>el</sub> abgeschätzt. Externe Kosten dieser Größenordnung würden die Stromerzeugungskostenrelationen nicht nennenswert verändern und auch die genannten spezifischen CO<sub>2</sub>-Minderungskosten der Kernenergie nur wenig beeinflussen.

Zusammenfassend läßt sich feststellen, daß durch eine Ausschöpfung der Stromerzeugungsmöglichkeiten der bestehenden Kernkraftwerke kurzfristig eine Vermeidung von 18 bis 27 Millionen Tonnen CO<sub>2</sub>/a möglich wäre. Der Ausbau der Kernenergie bietet mittelfristig ein beträchtliches CO<sub>2</sub>-Minderungspotential. Wenn man unterstellt, daß keine Hemmnisse den Zubau von Kernkraftwerken behindern oder verzögern, wäre aus technischer Sicht, im Rahmen einer forcierter Treibhausgasminderungspolitik, eine Vermeidung energiebedingter CO<sub>2</sub>-Emissionen durch eine Ausweitung der Kernenergienutzung von bis zu 150 Millionen Tonnen CO<sub>2</sub>/a im Jahr 2005 erreichbar, was etwa 20 Prozent der derzeitigen gesamten CO<sub>2</sub>-Emissionen der Bundesrepublik Deutschland (ohne ehemalige DDR) entspricht. Die Nutzung eines großen Teils dieses Minderungspotentials durch eine Vermeidung fossiler Energieerzeugung wäre dabei aus heutiger Sicht möglich, ohne die Kosten der Energiebereitstellung zu erhöhen. Die Ausweitung der Kern-

energienutzung würde auch einen wesentlichen Beitrag zur Reduktion anderer klimarelevanter Spurengase beziehungsweise ihrer Vorläufersubstanzen leisten.

## 5.2 Wesentliche Aspekte bei der Abschätzung der Potentiale der Kernenergie zur Reduzierung der klimarelevanten Spurengasemissionen<sup>1)</sup>

### 5.2.1 Umwelt-, Sicherheits-, Entsorgungs- und Akzeptanzaspekte der Kernenergienutzung

#### Grundzüge der sicherheitstechnischen Auslegung derzeitiger Kernkraftwerke

Ziel des Sicherheitskonzeptes ist es, die Freisetzung von größeren Mengen radioaktiver Stoffe zu verhindern und die normalbetrieblichen Emissionen auf festgelegte Maximalwerte zu begrenzen. Üblich ist die Definition folgender unterschiedlicher Anlagenzustände:

Für den bestimmungsgemäßen Betrieb und für Störfälle sind die maximal zulässigen Grenzwerte der Strahlenexposition der Umgebung in der Strahlenschutzverordnung festgelegt. Gegen diese Abläufe erfolgt keine gezielte Auslegung; die mit Unfällen verbundenen Strahlenbelastungen werden durch die Strahlenschutzverordnung nicht erfaßt.

Soweit inhärente Sicherheitseigenschaften vorhanden sind, reichen diese in der Regel nicht aus, die Schutzziele der Reaktorsicherheit zu erfüllen. Hierzu bedarf es vielmehr zusätzlicher ingenieurtechnischer Sicherheitsmaßnahmen. Grundlagen dieser Maßnahmen sind das Barrierenprinzip, die Sicherheitsebenen und die Auslegungsgrundsätze für Sicherheitseinrichtungen.

Das Barrierenprinzip besagt, daß die Spaltprodukte im Normalbetrieb durch mehrere hintereinanderliegende Barrieren in der Anlage zurückgehalten werden, von denen bei Störfällen noch mindestens eine Barriere intakt bleiben soll. Bei Unfällen liegt in der Regel ein Versagen aller Barrieren vor.

Als Sicherheitsebenen wurden bislang die Qualitätsgewährleistung, die Regel- und Schutzeinrichtungen und Sicherheitseinrichtungen bezeichnet.

Dieses Prinzip von den drei Sicherheitsebenen ist im Amerikanischen als defense-in-depth bekannt.

Seit dem Unfall in Tschernobyl und als Ergebnis von Risikostudien wird in jüngster Zeit eine vierte Ebene definiert, auf der mit Maßnahmen des anlageninternen Notfallschutzes die Abläufe und die Folgen von Unfällen beeinflußt werden sollen.

Die Auslegungsgrundsätze für Sicherheitssysteme fordern, daß die Funktion dieser Systeme auch bei Ausfall eines Teilsystems (Einzelfehlerkriterium) und bei gleichzeitiger Freischaltung eines weiteren Teilsystems aufgrund von Wartungs- und Reparaturmaß-

<sup>1)</sup> Dieser Teil wurde im Rahmen des Studienkomplexes A4 (vgl. 6. Kapitel) von Dipl.-Ing. Hahn federführend bearbeitet.

nahmen erhalten bleibt. Darüber hinaus sollen der Auslegung eine Reihe weiterer Prinzipien wie

- Redundanz
- Diversität
- Sicherheitsgerichtetes Ausfallverhalten (fail-safe)
- Selbstüberwachung
- Automatisierung
- Entmaschung
- räumliche Trennung

beachtet werden. Neben der Auslegung gegen anlageninternen ausgelöste Störfälle ist heute auch eine definierte Auslegung gegen Einwirkungen von außen vorgeschrieben.

Je nach Zeitpunkt der Planung der Anlage sind die genannten Prinzipien bei bestehenden Kernkraftwerken teilweise nur unvollständig oder gar nicht realisiert.

#### **Unfallrisiken unter besonderer Berücksichtigung der derzeitigen Leichtwasserreaktoren**

Jenseits des Bereichs der Störfälle sind als Unfälle bezeichnete Ereignisabläufe möglich, gegen die die Anlage nicht ausgelegt ist und bei denen die im vorigen Abschnitt genannten Prinzipien teilweise oder ganz unwirksam werden. In der Geschichte der Kerntechnik haben sich bereits mehrere Unfälle ereignet. Bei wassergekühlten Reaktoren sind insbesondere die Unfälle in Three Mile Island (1979) und in Tschernobyl (1986) zu nennen.

Neben praktischen Erfahrungen liegen über die Unfallrisiken insbesondere von Leichtwasserreaktoren auch umfassende analytische Ergebnisse aus Risikostudien vor, wobei allerdings die diesen Studien anhaftenden Unsicherheiten und Kenntnislücken im Auge behalten werden müssen.

Für die Bundesrepublik Deutschland (ohne ehemalige DDR) werden meist die Ergebnisse der Deutschen Risikostudie Kernkraftwerke, Phase A (Veröffentlichung 1979) und Phase B (Veröffentlichung 1989) für die Referenzanlage Biblis B herangezogen. Phase A, die methodisch in Analogie zur amerikanischen Reactor Safety Study (1975) durchgeführt wurden, weist eine Kernschmelzhäufigkeit von ca.  $10^{-4}$  pro Reaktorbetriebsjahr aus. Davon führen nach Phase A jedoch nur 2 Prozent der Unfälle zu einer frühen und massiven Radioaktivitätsfreisetzung, nämlich lediglich die Abläufe mit einer Dampfexplosion und mit dadurch hervorgerufenem frühen Containmentversagen. Weitere 1,4 Prozent der Fälle gehen mit einem Versagen des Gebäudeabschlusses und damit ebenfalls mit früher, aber geringerer Freisetzung einher. In 97 Prozent aller Kernschmelzunfälle geht Phase A von einem späten Überdruckversagen des Containments und einer damit verbundenen Freisetzung nach etwa einem Tag aus.

Die maximalen berechneten Schäden – ausgedrückt in Todesfällen in der Bevölkerung – betragen ca. 15 000 frühe Todesfälle und ca. 100 000 späte Todesfälle. Die Phase A wurde bezüglich ihrer Daten, An-

nahme, Modelle und Vollständigkeit dahin gehend kritisiert, daß sie die Eintrittshäufigkeit und das Schadensausmaß unterschätzt hätte und wesentliche Unfallphänomene und Schadensarten außer Acht gelassen hätte.

Entgegen den Anfang der achtziger Jahre geäußerten Erwartungen, es ließen sich erheblich geringere Risiken nachweisen, führte die Risikostudie Phase B keineswegs zu günstigeren Ergebnissen als die Phase A. Bezüglich der Häufigkeit von Unfällen sagt Phase B aus, daß die Häufigkeit von auslegungsüberschreitenden Anlagenzuständen, die mit den vorhandenen Sicherheitssystemen nicht beherrscht werden, ca.  $3 \cdot 10^{-5}$  pro Reaktorbetriebsjahr beträgt. Damit ist bei derzeitiger Anlagenauslegung die Kernschmelzhäufigkeit zwar um den Faktor drei geringer als in Phase A ermittelt. Die wesentliche neue Erkenntnis aus Phase B ist aber, daß nunmehr – umgekehrt als noch in Phase A – davon auszugehen ist, daß ohne Eingreifen des Personals praktisch jeder Kernschmelzunfall zu einem frühen Containmentversagen (nach ca. 2,5 – 5 Stunden) mit einer erheblichen Radioaktivitätsfreisetzung führt. Die Gründe hierfür liegen in den – in Phase A nicht berücksichtigten – Belastungen des Containments im Verlaufe eines Kernschmelzens unter hohem Primärkreisdruck („Hochdruckkernschmelzen“ findet in ca. 97 % aller Kernschmelzunfälle statt) und durch Wasserstoffexplosionen. Beide Phänomene führen zu Belastungen des Containments, die dessen Versagen erwarten lassen. Die hohen Freisetzungsteile bei einem solchen Versagen sind in Tabelle 14 dargestellt und mit den Quelltermen der Phase A und des Tschernobyl-Unfalls verglichen.

Man erkennt, daß die in Phase B berechneten Anteile an freigesetzten Radionukliden höher sind als in Phase A berechnet und höher als beim Tschernobyl-Unfall beobachtet. Unfallfolgen wurden in Phase B nicht ausgewiesen; somit ist die Phase B auch keine Risikostudie im eigentlichen Sinne. Qualitativ lassen sich aber in der Tendenz dennoch Aussagen zum Unfallrisiko – im Vergleich zur Phase A – ableiten. Danach läßt sich schließen, daß das Unfallrisiko erheblich höher ist als früher angenommen, da unter anderem.

- die Häufigkeit von Unfällen mit frühen, massiven Freisetzungen um etwa eine Größenordnung angestiegen ist, und
- die Freisetzungsteile der für die Spätfolgen – neben anderen Nukliden – relevanten Aktiniden erheblich angestiegen sind, und
- die Unfallfolgenrechnungen wegen der revidierten Dosis-Wirkungs-Beziehungen (bei gleichen Quelltermen) zu höheren Schäden führen als früher.

Für die Folgen eines Unfalles muß nach heutigem Kenntnisstand und unter Berücksichtigung hiesiger Standortverhältnisse und der kurzen Vorwarnzeiten mit nochmals weit höheren mittleren und maximalen Schäden in der Umgebung gerechnet werden als in Phase A abgeschätzt.

Die Phase B weist auf Möglichkeiten des anlageninternen Notfallschutzes hin, mit denen unter bestimm-

## Freisetzungbruchteile bei Kernschmelzunfällen im Vergleich

Element	DRS-B: HD-Pfad	DRS-A: FK 1	DRS-A: FK 2	Tschernobyl
Edelgas .....	100,0 %	100,0 %	100,0 %	100,0 %
Jod .....	> 50,0 %	79,0 %	40,0 %	20,0 %
Cäsium .....	> 50,0 %	50,0 %	29,0 %	13,0 %
Tellur .....	> 40,0 %	35,0 %	19,0 %	15,0 %
Strontium .....	42,0 %	6,7 %	3,2 %	4,0 %
Aktinide .....	3,9 %	0,3 %	0,3 %	3,2 %
Barium .....	24,0 %	6,7 %	3,2 %	5,6 %
Häufigkeit ohne Accident-Management- Maßnahmen .....	2,9 E <sup>-5</sup>	2,0 E <sup>-6</sup>	6,0 E <sup>-7</sup>	
Häufigkeit mit Accident-Management- Maßnahmen .....	4,5 E <sup>-7</sup>			

ten Umständen Unfälle noch verhindert oder in ihrem Verlauf abgemildert werden können. Daß ein solches Potential im Ernstfall genutzt werden sollte, ist unstrittig. Umstritten ist aber die Frage, inwieweit von solchen Maßnahmen in Risikostudien bereits Kredit genommen werden darf, bevor sie bereits technisch realisiert, im Notfallhandbuch festgelegt, geprüft, bewertet, genehmigt und vom Personal trainiert sind. Als weiterer gravierender Mangel ist das Fehlen einer ausreichenden Instrumentierung, mit welcher dem Operateur im auslegungsüberschreitenden Bereich die notwendige Kenntnis des Anlagenzustandes vermittelt wird. Während also fundamentale technische, wissenschaftliche, organisatorische, rechtliche und genehmigungstechnische Voraussetzungen für wichtige Maßnahmen nicht vorhanden sind, wird in der Risikostudie – vorläufig – von einer Erfolgswahrscheinlichkeit für die Maßnahmen von bis zu 99 % ausgegangen. Dem wird über das oben Gesagte hinaus entgegengehalten, daß eine vollständige Analyse der möglichen nachteiligen Wirkungen der Maßnahmen, ohne die eine Risikobeurteilung fehlerhaft ist, nicht durchgeführt wurde. Nicht gelöst ist bei Druckwasserreaktoren die Wasserstoffproblematik, obwohl die Risikorelevanz von Wasserstoffexplosionen bei Kernschmelzunfällen wegen der Möglichkeit einer frühen Containmentzerstörung seit vielen Jahren bekannt ist. Für Siedewasserreaktoren ist eine Risikostudie noch nicht abgeschlossen; aufgrund des aktuellen Kenntnisstandes ist aber derzeit nicht zu erwarten, daß die Ergebnisse für die Häufigkeit von Unfällen sich von den DWR-Ergebnissen fundamental unterscheiden. Risikostudien für andere Reaktorkonzepte sind weniger weit entwickelt als für Leichtwasserreaktoren, was Methodik, Modelle zur Beschreibung wesentlicher Phänomene und die Datenbasis angeht. In der Bundesrepublik Deutschland (ohne ehemalige DDR) wurde für den SNR-300 in Kalkar auf Antrag der Enquete-Kommission „Zukünftige Kernenergiepolitik“ eine „Risikoorientierte Studie“ durchgeführt, an der zwei unterschiedliche Arbeitsgruppen beteiligt waren.

Für verschiedene Konzepte von Hochtemperaturreaktoren liegen von Seiten der Kernforschungsanlage Jü-

lich probabilistische Sicherheitsstudien vor, bei denen die Quantifizierung der Häufigkeiten von Ereignisabläufen und die Identifizierung von Schwachstellen in der Anlagenauslegung meist Vorrang vor der Berechnung der Unfallfolgen hat. In der Regel werden in den vorgelegten Untersuchungen geringere Häufigkeiten für Unfälle mit frühen und großen Radioaktivitätsfreisetzungen als in Studien für Leichtwasserreaktoren ermittelt.

#### Perspektiven neuer Reaktorlinien und Kernenergiekonzepte aus sicherheitstechnischer Sicht

Die derzeit angewandte Sicherheitsphilosophie in der Kerntechnik beruht auf dem Konzept der Vorsorge gegen bestimmte Auslegungsstörfälle und auf einem zu diesem Zweck entwickelten deterministischen Prinzip gestaffelter Sicherheitsbarrieren. Die Integrität der Barrieren kann nicht ohne eine Reihe von aktiven Sicherheitssystemen gewährleistet werden, die nach bestimmten Auslegungsprinzipien wie Redundanz, Diversität, räumliche Trennung, Schutz gegen äußere Einwirkungen konzipiert werden sollen. Die Gesamtheit der Sicherheitsmaßnahmen wird in Anlehnung an das in den USA formulierte „defense-in-depth“-Konzept drei verschiedenen Sicherheitsebenen (Qualitätsgewährleistung; Verhinderung von Störfällen; Begrenzung von Störfällen) zugeordnet. Die Verwundbarkeit der nach der derzeitigen Sicherheitsphilosophie konzipierten Systeme liegt in der Tatsache begründet, daß zwar für die Auslegungsstörfälle die Schäden außerhalb der Anlage auf ein festgelegtes Maß begrenzt bleiben, daß aber jenseits des Bereichs der Auslegung Unfälle mit extrem hohen Schäden möglich sind und diese Schäden in räumlicher und in zeitlicher Dimension eine erhebliche Reichweite haben können. Neuerdings soll dem so genannten defense-in-depth-Konzept nachträglich eine vierte Ebene, mehr administrativer als technischer Art, zur Verhinderung beziehungsweise Begrenzung von Unfällen hinzugefügt werden.

Im Bereich der konzeptionellen Überlegungen und Planungen für zukünftige Reaktoren sind einige unterschiedliche Denkansätze erkennbar. Verschiedentlich wird eine Einteilung der Entwicklungstendenzen in eine evolutionäre und eine revolutionäre Strömung vorgenommen. Vom sicherheitskonzeptionellen Ansatz her ist jedoch auch eine Einteilung in drei Tendenzen möglich und sinnvoll, da diese die sicherheitstechnischen Ansätze präziser wiedergibt:

- eine Tendenz der „Fortführung“, charakterisiert durch die weitere Nutzung der derzeitigen Technik (insbesondere LWR) in wenig veränderter Form, Optimierung in ökonomischer Hinsicht, effizientere Brennstoffausnutzung, in sicherheitstechnischer Hinsicht jedoch Beibehaltung der derzeitigen Auslegungsmerkmale,
- eine Tendenz der „Weiterentwicklung“, charakterisiert durch die Nutzung heutiger Grundkonzepte, jedoch in stark abgewandelter Form, mit dem Ziel der spürbaren Reduzierung der Eintrittshäufigkeit von schweren Unfällen durch verstärkte Nutzung passiver Systeme,
- eine Tendenz des „Neuanfangs“, charakterisiert durch die Entwicklung neuer Reaktorkonzepte mit dem Ziel der deterministischen Begrenzung der maximalen Unfallfolgen auf „akzeptable“ Größenordnungen mit Hilfe naturgesetzlicher Mechanismen und passiver Systeme anstelle aktiver technischer Systeme.

Eine strikte Grenzziehung zwischen den beschriebenen Entwicklungstendenzen ist nicht in allen Fällen möglich. Es lassen sich auch differenziertere Klassifizierungen konstruieren.

Zur Kategorie der Entwicklungstendenzen der Fortführung können insbesondere die deutschen und französischen Pläne für eine zukünftige Generation neuer Druckwasserreaktoren der Leistungsklasse von ca. 1400 Megawatt (MW) gezählt werden. Wesentliche Sicherheitsgewinne sind insbesondere hinsichtlich der maximalen Schäden nach Unfällen von diesen Entwicklungen nicht zu erwarten.

In die Kategorie Weiterentwicklungen lassen sich Konzepte von verkleinerten wassergekühlten Reaktoren, zum Beispiel amerikanischer Druck- und Siedewasserreaktoren (AP-600, SBWR) oder des weiterentwickelten Advanced CANDU-Reaktor einordnen. Auch die Weiterentwicklung mittelgroßer Hochtemperaturreaktoren zum Beispiel in Form des HTR-500 sowie die großen Heizreaktoren nach dem LWR-Prinzip gehören in diese Kategorie.

Neu von der sicherheitstechnischen Grundkonzeption her sind Pläne für Heizreaktoren der Leistungsklasse bis zu einer thermischen Leistung von 50 MW, für die verschiedenen Varianten des PIUS-Reaktors, für kleine Hochtemperaturreaktoren nach dem Modul-Prinzip (in der Bundesrepublik Deutschland und den USA) und – mit großen Einschränkungen – für den natriumgekühlten Brutreaktor PRISM.

Von der Konzeptidee her versprechen die zuletzt genannten Vorschläge zumindest bezüglich bestimmter Gesichtspunkte teilweise erhebliche Sicherheitsgewinne. Kein Konzept ist jedoch soweit entwickelt, daß

seine Eigenschaften auf der Grundlage einer vollständigen sicherheitstechnischen Begutachtung abschließend zu beurteilen wäre. Beim derzeitigen Planungsstand bestehen bei allen vorgeschlagenen Konzepten noch ungeklärte Fragen in technischer, und auch in sicherheitstechnischer Hinsicht. Relativ umfangreich sind die Planungsunterlagen für Hochtemperaturreaktor-Konzepte nach dem Modul-Prinzip mit einer thermischen Leistung von ca. 200 MW pro Modul.

Die erwarteten Sicherheitsvorteile können daher nur dann effektiv zum Tragen kommen, wenn die HTR-spezifischen Störfallmöglichkeiten, insbesondere infolge von Graphitkorrosion bei Graphit-Wasser-Reaktionen und Graphitbränden, aufgrund passiver Mechanismen eliminiert werden können. Der Nachweis, daß alle Störfallmöglichkeiten aufgrund anlageninterner Ursachen entstehen, ist damit jedoch noch nicht erbracht, solange die Folgen von Ereignissen wie Behälterversagen nicht analysiert sind. Darüber hinaus bleibt die Möglichkeit gezielter Sabotage- oder Gewalteinwirkung sowie der Auslösung von Freisetzungen infolge extremer externer Ereignisse bestehen.

Vom Gesichtspunkt der Risikoabschätzung aus gesehen ist – trotz der derzeitigen Erwartungen – eine abschließende Einordnung der Risiken fortgeschrittener Reaktorkonzepte auf der Basis heutiger Planungen noch nicht möglich. Im übrigen sollte sich die Risikoabschätzung für eine Reaktorlinie nicht nur auf das Unfallrisiko des Reaktors selber, sondern auf das Gesamtsystem einschließlich der Ver- und Entsorgungseinrichtung beziehen.

### **Umwelt-, Sicherheits- und Risikoaspekte der Brennstoffver- und -entsorgung**

Neben den Risiken aus dem Reaktorbetrieb bestehen – jeweils in unterschiedlicher Weise – für Beschäftigte und Bevölkerung auch radiologische Risiken durch den Betrieb von Uranbergwerken, von Anlagen zur Erzaufbereitung, von Konversionsanlagen, von Urananreicherungsanlagen, von Brennelementfabriken, von Wiederaufbereitungsanlagen, von Anlagen zur Entsorgung der abgebrannten Brennelemente und der anfallenden Abfälle, durch den Abriß der Nuklearanlagen, durch die diversen Transportvorgänge und schließlich durch die Endlager.

Größtenteils sind die Risiken dieser einzelnen Stationen weniger detailliert untersucht als die Unfallrisiken derzeitiger Leichtwasserreaktoren. Dennoch sind qualitative Aussagen zu bestimmten Fragestellungen bereits heute möglich.

Die Aussage, daß das radiologische Risiko des Gesamtsystems Kernenergie durch den Betrieb des Kraftwerks bestimmt wird, kann keine Allgemeingültigkeit besitzen, da sie lediglich auf Untersuchungen zu Systemen mit Leichtwasserreaktoren beruht. Außerdem ist die Gültigkeit und Aussagesicherheit dieser Untersuchungen (zum Beispiel von EPRI, KfK) umstritten.

Umwelt-, Sicherheits- und Risikoaspekte bei der Gewinnung und Aufbereitung von Uranerz können sich prinzipiell ergeben in den drei Bereichen

- dauernde Gefährdung der Beschäftigten,
- dauernde Gefährdung der Bevölkerung,
- Störfallauswirkungen,

wobei hierunter die Auswirkungen von Radioaktivität und von im Uranerz enthaltener Schwermetalle erfaßt sind. Die hauptsächliche radiologische Belastung der Beschäftigten und der in der Umgebung lebenden Bevölkerung resultiert aus dem freigesetzten Radon, aber auch aus Staubteilchen, die Uran und seine Zerfallsprodukte enthalten. Wegen des geringen Urangehaltes in den Uranerzen wird an den eigentlichen Abbau eine aufwendige Verarbeitung zur Konzentrierung des Urans angeschlossen. Typisch für den derzeitigen Betrieb der Uranerzgewinnung und der Uranerzaufbereitung sind große Abraumhalden, in denen sich die radioaktiven Begleitstoffe des Urans sowie nicht abgetrennte Uranmengen befinden. Die Halden stellen eine Langzeitexpositionsquelle für die Umgebung über die Betriebsphase hinaus dar. Die amerikanische Studie des EPRI kommt zu dem Ergebnis, daß einer nach dem Reaktorbetrieb größten Risiko beiträge der Brennstoffkette vom Uranabbau herührt. Nach EPRI liegt er jedoch nur bei weniger als 1 % des Gesamtrisikos. Einige neuere Veröffentlichungen gehen davon aus, daß das Risiko durch den Uranabbau – u. a. wegen der langen Expositionszeiten – bisher drastisch unterschätzt wurde. Wirkungsvolle Maßnahmen zur Verringerung der Emissionen aus den Halden werden derzeit nicht realisiert.

Neben den radiologischen Auswirkungen müssen die Auswirkungen auf die Landschaft und die ökologischen Verhältnisse in den Abbaugebieten sowie die Gesamtheit der Auswirkungen auf das Leben der Einwohner in den Abbaugebieten betrachtet werden.

In den Bereichen Konversion und Anreicherung sind die radiologischen Risiken im Vergleich mit anderen Stationen der Brennstoffmengen geringer.

Die Risiken im Zusammenhang mit dem Betrieb von Brennelementfabriken entstehen in radiologischer Hinsicht für die Beschäftigten im Normalbetrieb und für Beschäftigte und Umgebung bei Störfällen. Art und Höhe der Gefährdung hängen zum einen von der Art des verarbeiteten Kernbrennstoffes ab, zum anderen vom Produktionsverfahren, von den Abschirm- und Rückhaltmaßnahmen und von der sicherheitstechnischen Auslegung. Neben radiologischen sind auch chemische Gefährdungen sowie Kontaminationen von Boden und Abwassersystemen möglich.

Auf der Entsorgungsseite ist es erforderlich, eine Vielzahl unterschiedlicher Abfallströme aus den diversen Anlagen zu unterscheiden. Derzeit fallen pro Jahr in den 21 bundesdeutschen Leichtwasserreaktoren etwa 600 Tonnen abgebrannte Brennelemente an, daneben zusätzlich erhebliche Mengen schwach- und mittelaktive Abfälle. Bei neueren Druckwasserreaktoren geht der Hersteller Siemens/KWU von 1350 200-l-Fässern mit schwachaktiven und 90 bis 110 200-l-Fässern mit mittelaktiven Abfällen pro Jahr aus. Diese Zahlen stimmen mit Angaben der VDEW, die für die zwölf derzeit betriebenen großen Druckwasserreaktoren 3500 m<sup>3</sup> unbehandelte Betriebsabfälle pro Jahr angibt, relativ gut überein. Pro Anlage sind dies jähr-

lich im Mittel 292 m<sup>3</sup>, die – unbehandelt – ca. 1460 200-l-Fässer füllen.

Für Siedewasserreaktoren sind die Abfallmengen höher: 400 m<sup>3</sup> pro Jahr für sieben Anlagen (VDEW 1988). Dies entspricht etwa 570 m<sup>3</sup> beziehungsweise 2860 200-l-Fässern mit unbehandelten Abfällen pro Jahr und Anlage.

Abgebrannte Brennelemente müssen aufgrund ihrer Wärmeentwicklung nach der Entladung aus dem Reaktor für einige Monate unter Kühlung gelagert werden. Erst danach können sie zu einer externen Zwischenlagerung transportiert werden. Allerdings lagern die Brennelemente in der Realität meist einige Jahre in kraftwerksinternen Lagerbecken, zum Teil in sogenannter Kompaktlagerung, bevor sie abtransportiert werden.

Zur externen Zwischenlagerung kommen prinzipiell Trocken- und Naßlager in Betracht.

In der Bundesrepublik Deutschland (ohne ehemalige DDR) werden Trockenlager favorisiert. Von dieser Bauart sind das ehemalige Brennelementeingangslager Wackersdorf, das Zwischenlager Gorleben und das Zwischenlager Ahaus. Die Kapazität dieser Zwischenlager beträgt jeweils 1500 Tonnen abgebrannter Brennelemente.

Im Falle von Behälterundichtigkeiten ist bei Trockenlagern eine Emission radioaktiver Stoffe direkt in die Umgebung möglich, da wegen des notwendigen Naturzugs keine Schwebstofffilter in die Abluftführung eingebaut werden können. Somit besteht gegenüber Freisetzungen radioaktiver Stoffe in die Umgebung als einzige Barriere die Behälterabdichtung, denn nach langjährigen Lagerzeiten ist mit einer hohen Rate an Leckagen der Brennstabhüllrohre zu rechnen. Die Behälterdichtungen im in der Bundesrepublik Deutschland verfolgten Konzept des sogenannten Castor-Behälters sind nicht vollwertig nach dem Mehrbarrierenprinzip ausgeführt.

Zwischenlagerkapazitäten sind ebenfalls für schwach- und mittelaktive erforderlich. Die notwendigen Kapazitäten sind erheblich, da bisher weltweit in vielen Fällen eine Einlagerung mangels Endlagerkapazitäten nicht möglich ist. Neben Zwischenlagern an den Standorten der Abfallverursacher gibt es externe zentrale Zwischenlager für konditionierte schwach- und mittelaktive Abfälle.

Es ist absehbar, daß noch in diesem Jahrzehnt Engpässe im Zwischenlagerbereich eintreten werden, wenn ein Endlager nicht wie geplant zur Verfügung steht. Wenn zusätzliche, außergewöhnliche Abfallmengen zum Beispiel als Folge eines Unfalls anfallen, würde dies die Abfallsituation noch verschärfen.

Ein funktionsfähiges Endlager steht auch für die hochradioaktiven Abfälle nicht zur Verfügung. Erkundet wird derzeit die Eignung des Salzstockes Gorleben. Die geplanten Inbetriebnahmezeitpunkte verschieben sich in so rascher Folge, daß eine verbindliche Angabe derzeit nicht möglich ist; dies gilt unabhängig von der Frage, ob Gorleben überhaupt als Endlager geeignet ist.

Weitere zu berücksichtigende Stationen des Brennstoff- und Abfallweges sind u. a. die Bereiche Abriß,

Rezyklierung oder Deponierung von aktiviertem Material, Konditionierung und Transporte, die unter Risiko- und Umweltbelastungsgesichtspunkten alleinstens unterschiedlich zu beurteilen sind. Gesamtsystematische und belastbare Risikoassessungen auf quantitativer Basis liegen vielfach noch nicht vor. Häufig muß man sich damit zufrieden geben, die Probleme und die vermutlich risikorelevanten Einflußgrößen qualitativ beschreiben zu können.

Die Stilllegung von Nuklearanlagen soll vom Prinzip her in den 3 Stufen

- Außerbetriebnahme der Anlage,
- Sicherer Einschluß und
- Endgültige Beseitigung erfolgen.

In den USA sind bisher lediglich kleinere Reaktoren beseitigt worden, in Europa ist noch kein Stilllegungsprojekt nach Stufe 3 durchgeführt worden. In der Bundesrepublik Deutschland (ohne ehemalige DDR) wird derzeit an der Beseitigung des Kernkraftwerkes Niederachbach gearbeitet, das jedoch nicht repräsentativ für große Leichtwasserreaktoren nach langjährigem Betrieb ist. Abschließende, wissenschaftlich unumstrittene Risikoassessungen bezüglich der Stilllegung von Nuklearanlagen sind heute nicht möglich.

Für Transportvorgänge werden abgebrannte Brennelemente und radioaktive Abfälle in unterschiedlichen Behältern verpackt. Der Verpackung fällt die wichtigste Aufgabe bei der Gewährleistung der Sicherheit zu. Die Anforderungen an die Verpackung steigen mit der Aktivität und dem Gefährdungspotential des radioaktiven Inhalts. Selbst bei schweren Unfällen soll es zu keiner unzulässigen Freisetzung radioaktiver Stoffe kommen. Dennoch sind bei Transportunfällen Belastungen möglich, die über die Auslegungsgrenzen der Behälter hinausgehen. In der Bundesrepublik Deutschland (ohne ehemalige DDR) wurden in den vergangenen Jahren im Mittel 80 bis 100 Transporte pro Jahr mit abgebrannten Brennelementen durchgeführt. Daneben wurden jährlich 1200 bis 1300 Tonnen Uranhexafluorid transportiert. Des Weiteren findet eine große Zahl von Transporten mit schwach- und mittelradioaktiven Abfällen statt. Unfälle, bei denen größere Mengen Radioaktivität ausgetreten ist, hat es in der Bundesrepublik Deutschland dabei nicht gegeben. Eine systematische Abschätzung der Risiken durch Transportunfälle liegt bislang nicht vor.

Vorliegende Vergleiche zwischen den Entsorgungsstrategien mit und ohne Wiederaufarbeitung lassen den eindeutigen Schluß zu, daß der Verzicht auf Wiederaufarbeitung zu geringeren Strahlenbelastungen und -risiken führt als die Wiederaufbereitungsvariante, und zwar sowohl für den Normalbetrieb als auch für Stör- und Unfälle.

Bezüglich der radiologischen Risiken durch endgelagerte Abfälle, insbesondere im Langzeitbereich, wurden im Rahmen des Projektes Sicherheitsstudien Entsorgung (PSE) Dosisabschätzungen für ein Modelllager durchgeführt. Die wissenschaftliche Kontroverse um die verwendeten Daten, Annahmen, Modelle, Methoden läßt den Schluß zu, daß bisherige Risikoabschätzungen im Hinblick auf konkrete unterirdische Lager praktisch keine Aussagekraft haben.

Insgesamt führt die Auswertung des aktuellen Wissensstandes zu dem Ergebnis, daß eine belastbare systematische und aktuelle Gesamtrisikobetrachtung für die Varianten des sogenannten Brennstoffkreislaufs nicht existiert. Es muß an dieser Stelle darauf hingewiesen werden, daß die Ergebnisse – die zwar häufig verwendet werden – teilweise veraltet sind, für US-amerikanische Verhältnisse ermittelt wurden, mit extremen Unsicherheiten behaftet sind und allesamt in keiner Weise abgesichert sind. Es muß daher dringend empfohlen werden, die Ergebnisse nicht zu verwenden – auch nicht für grobe, vergleichende Aussagen –, ohne die der EPRI-Studie zugrundeliegenden Modelle, Annahmen, Daten und Unsicherheiten überprüft zu haben.

### **Wirkung ionisierender Strahlung und radioaktive Emissionen aus Kernkraftwerken**

Bei der Abschätzung von Gesundheitsrisiken durch den Betrieb von Kernkraftwerken und anderen kerntechnischen Anlagen ist grundsätzlich zu unterscheiden zwischen den Belastungen durch radioaktive Emissionen aus dem Normalbetrieb, aus Störfällen und aus auslegungsüberschreitenden Unfällen. Weiterhin ist zu differenzieren nach den in den Anlagen Beschäftigten und der restlichen Bevölkerung. Methodischer Zugang zu der Ermittlung von Schäden als Folge von Strahlenbelastungen und ihrer dosisabhängigen Eintrittswahrscheinlichkeit besteht entweder in der direkten Beobachtung mittels epidemologischer Untersuchungen oder in analytischen Abschätzungen bei Risikountersuchungen.

Die maximal zulässigen Grenzwerte der Strahlenbelastung für den Normalbetrieb und für (definitionsgemäß beherrschte) Störfälle sind in der Strahlenschutzverordnung festgelegt. Neben den Grenzwerten beinhaltet die Strahlenschutzverordnung ein Gebot zur Minimierung der Strahlenbelastungen auch unterhalb der Grenzwerte. Für beruflich Strahlenexponierte gelten weit höhere Grenzwerte als für die Bevölkerung im Falle der Normalbetriebsbelastungen; beruflich Strahlenexponierte können daher entsprechend höheren Belastungen ausgesetzt sein.

Wichtigste Basis zur Abschätzung der Dosis-Wirkungs-Beziehungen stellen die Untersuchungen an den Überlebenden der Atombombenabwürfe auf Hiroshima und Nagasaki dar. Weitere wichtige epidemologisch untersuchte Gruppen sind beispielsweise Patientenkollektive und Kollektive beruflich Strahlenexponierter. Die Abschätzung der Strahlenwirkung bis hin zu sehr geringen Strahlendosen muß aufgrund von Extrapolationen erfolgen, deren Plausibilität mit theoretischen Kenntnissen über die Wirkungszusammenhänge zu überprüfen ist. Für die Form der Dosis-Wirkungs-Beziehung im niedrigen Dosis-Bereich existieren unterschiedliche Ansätze, zum Beispiel eine lineare oder eine linear-quadratische Form. Die überwiegende Zahl der Fachleute geht heute davon aus, daß eine lineare Extrapolation der Dosis-Wirkungs-Beziehung bis zu kleinsten Strahlendosen der sinnvollste Beschreibungsansatz ist. Die häufig benutzte Relation nach ICRP 26 von ca.  $10^{-4}$  pro manrem Ganzkörperdosis muß nach der Neubewertung der Hiroshima-Daten im Mittel um einen Faktor von min-



destens 3 bis 7 nach oben revidiert werden. Für bestimmte Schäden und bestimmte Gruppen sind noch höhere Korrekturen erforderlich. Eine endgültige Neuempfehlung der ICRP steht noch aus.

Statistisch signifikante Erkenntnisse aus epidemiologischen Untersuchungen über Strahlenwirkungen im Millirem-Bereich liegen nicht vor. Daraus kann aber nicht gefolgert werden, daß entsprechende Strahlenrisiken nicht real, sondern hypothetisch wären. Es läßt sich weder aus theoretischen noch aus experimentellen Befunden eine untere Schwelle postulieren oder gar begründen, unterhalb derer radioaktive Strahlung unschädlich ist. Die Existenz eines positiven Effektes geringer Strahlendosen („Hormesis“) läßt sich nicht plausibel begründen geschweige denn nachweisen. Für die bekanntesten Folgen niedriger Strahlendosen, insbesondere für Krebserkrankungen, wird ein Hormesis-Effekt in der Regel verneint. Während sich für die Grenzwerte der Strahlenbelastung für die Bevölkerung keine Änderungen abzeichnen, wird inzwischen die Reduzierung der Belastung beruflich strahlenexponierter Personen vorgeschrieben. Nach den Revisionen der Dosis-Wirkungs-Beziehungen erscheint es heute noch weniger als früher verantwortbar, solche Personen regelmäßig bis zu den jährlichen Dosisgrenzwerten zu belasten. Um solche Belastungen auch für kleinere Gruppen zu vermeiden, verlangt die novellierte Strahlenschutzverordnung neuerdings, über das generelle Minimierungsgebot und den Jahresgrenzwert von 50 mSv hinaus die Lebenszeitdosis für beruflich strahlenexponierte auf 400 mSv zu begrenzen. In Großbritannien und Schweden wurde die zulässige Jahresdosis für berufliche Tätigkeit auf 15 mSv begrenzt.

### Klimaaspekte radioaktiver Spurengase

Die beiden im Rahmen des Studienprogramms vorgelegten Arbeiten zu möglichen klimarelevanten Wirkungen des Krypton-85 (Kr-85) in der Atmosphäre sowie zu diesen Arbeiten abgefaßte Stellungnahmen, können erwartungsgemäß das Thema nicht abschließend behandeln. Beide Studien beinhalten einen Problemaufriß und eine Literaturlauswertung. Sie dokumentieren den internationalen Wissensstand und lassen einen notwendigen Forschungsbedarf erkennen.

Krypton-85 ist ein radioaktives Spurengas, das als Spaltprodukt in Kernreaktoren entsteht und hauptsächlich bei der Wiederaufarbeitung von abgebrannten Brennelementen in die Atmosphäre freigesetzt wird. Seit Beginn der militärischen und zivilen Nutzung der Kernenergie hat die Konzentration von Kr-85 in der Erdatmosphäre kontinuierlich zugenommen. Sie beträgt derzeit etwa 1 Becquerel (Bq)/m<sup>3</sup>. Die Reichweite der Beta-Strahlung in der Luft beträgt maximal 1,8 m. Bei der Frage, ob und in welcher Weise Kr-85 das Klima beeinflussen kann, sind zwei unterschiedliche Wirkungsmechanismen zu untersuchen, nämlich luftelektrische Effekte und strahlenchemische Reaktionen in der Atmosphäre.

Ob und inwieweit Krypton-85 über luftelektrische Effekte einen Einfluß auf das Klima nehmen kann, läßt sich aus der vorliegenden Literatur nicht eindeutig beantworten. Physikalisch führt eine Zunahme der Kr-85-Konzentration zu einer Erhöhung der elektri-

schen Leitfähigkeit der Atmosphäre, wodurch sich eine niedrigere elektrische Feldstärke in der Atmosphäre einstellen kann. Gesicherte Erkenntnisse, welche Kr-85-Konzentrationen spürbare Effekte hervorrufen oder bis zu welchen Konzentrationen mit Sicherheit keine negativen Auswirkungen zu erwarten sind, gibt es nicht. Es sind daher lediglich Abschätzungen möglich, die orientiert an der Variation und der Größe der natürlichen Luftelektrizität Aussagen treffen, bis zu welchen Kr-85-Konzentrationen keine Klimaefekte erwartet werden. Diese Aussagen sind mit Unsicherheiten behaftet. Erschwerend kommt hinzu, daß das Krypton-Problem nicht isoliert betrachtet werden darf, sondern vermutlich in Wechselwirkung mit anderen natürlichen oder vom Menschen verursachten luftelektrischen Effekten steht. Faude und König vertreten unter Hinweis auf elektrische Leistungsbeurteilungen die Meinung, daß die luftelektrischen Effekte des Kr-85 mit großer Wahrscheinlichkeit keinen Einfluß auf das Klima haben, daß es aber – schon um andere unerwünschte Nebenwirkungen zu vermeiden – geraten scheint, die Kr-85-Konzentration zu limitieren. Die Autoren gehen davon aus, daß eine Konzentration von 100 Bq/m<sup>3</sup> tolerierbar ist. Auf der anderen Seite schätzen Kollert und Butzin ab, daß eine Kr-85-Konzentration von 60 Bq/m<sup>3</sup> global zu einer Zunahme der natürlichen Luftionisation über der Meeres- und Polarregion um 50 % sowie zu einer Annahme des globalen Luftwiderstandes und der globalen Feldstärke der Atmosphäre um 10 % führt. Die Autoren schließen nicht aus, daß bereits bei einem Anstieg des Krypton-85-Pegel auf 10 Bq/m<sup>3</sup> das luftelektrische System merklich beeinflusst wird.

Größer ist die Kontroverse zwischen den beiden Autorengruppen bezüglich der Aussagesicherheit über etwaige Auswirkungen luftchemischer Effekte. Während Faude und König davon ausgehen – und von Crutzen unterstützt werden – daß luftchemische Effekte weder global noch lokal eine Rolle spielen, schließen Kollert und Butzin einen Einfluß strahlenchemischer Art nicht aus, insbesondere in Luftpaketen infolge der diskontinuierlichen Emissionen aus Wiederaufbereitungsanlagen. Eindeutig und zweifelsfrei belegbar und ausreichend abgesichert ist weder die eine noch die andere Einschätzung, auch wenn die Modellrechenbeispiele durchaus plausibel sind. Angesichts der Komplexität der Vorgänge ist die entscheidende Frage, ob mit den Modellrechnungen die Realität ausreichend genau wiedergegeben wird. Obwohl sich – von beiden Autorengruppen – für einzelne Aussagen durchaus unterstützende quantitative Argumente angeben lassen, so ist doch eine Gesamtbewertung der Krypton-Problemik beim heutigen Kenntnisstand nicht möglich. Auch wegen der über die möglichen Kr-85-Problemik hinausgehenden Bedeutung der antropogen freigesetzten Partikel auf die Luftchemie und -physik wird hier ein wichtiger Forschungsbedarf gesehen.

Als Richtwert für die von einigen Autoren als Grenzkonzentration für Krypton-85 von 100 Bq/m<sup>3</sup> in der Atmosphäre kann gelten, daß dieser Wert bei einer Verzehnfachung der derzeitigen Kernkraftwerksleistung erreicht wird, wenn das entstehende Krypton-85 vollständig aus den dann installierten Wiederaufbereitungsanlagen abgegeben wird.

Eine vorsichtige Wertung des gegenwärtigen Kenntnisstandes über die Klimarelevanz läßt – bei allen Unsicherheiten – folgende Feststellungen zu:

- Für einen Klimaeffekt der derzeitigen Kr-85-Konzentration (ca. 1 Bq/m<sup>3</sup>) liegen keine Hinweise vor. Bei einer weiteren Nutzung der Kernenergie im gegenwärtigen Umfang ist bei vollständiger Freisetzung die Kr-85-Konzentration unterhalb der Schwelle, die von einem Teil der Autoren für bedenklich gehalten wird.
- Bei einem weiteren Ausbau der Kernenergie ist zur Vermeidung von Klimaeffekten vorsorglich die Rückhaltung von Kr-85 vorzusehen. Auch wegen der über die mögliche Kr-85-Problematik hinausgehenden Bedeutung der anthropogen freigesetzten Partikel auf die Luftchemie und -physik wird hier ein wichtiger Forschungsbedarf gesehen.

### Mögliche Auswirkungen nichtradiologischer Art

Von einer Vielzahl von Autoren – stellvertretend seien die Namen von Weizsäcker, Maier-Abich, Scheffold, Roßnagel genannt – werden mögliche Auswirkungen der Kernenergienutzung genannt, die nicht auf radioaktiver Strahlenwirkung, sondern auf anderen, auch nichttechnischen Wirkungszusammenhängen beruhen.

Bereits die Bundestags-Enquete-Kommission „Zukünftige Kernenergiepolitik“ hat in ihrem Abschlußbericht von 1980 nicht nur radiologische Risiken der Kernenergie betrachtet, sondern zur Bewertung von Energiesystemen die Kriterien Wirtschaftlichkeit, internationale Verträglichkeit, Umweltverträglichkeit und Sozialverträglichkeit vorgeschlagen.

Dementsprechend sind zur Beurteilung der Risiken der Kernenergie auch die Risiken zu berücksichtigen, die nicht radiologischen Ursprungs sind, jedoch bezüglich anderer Schadensarten ein Schadenspotential besitzen.

Nationale und insbesondere internationale Belange (Stichwort: internationale Verträglichkeit) können durch die Möglichkeiten des militärischen Mißbrauchs waffenfähigen Materials und bestimmter Anlagen berührt werden. Ein weiterer Aspekt ist die Verwundbarkeit kerntechnischer Anlagen gegenüber Krieg, Sabotage und terroristischen Aktionen. Die internationale Verträglichkeit hängt ferner davon ab, inwieweit ein Energiesystem den internationalen Verteilungskampf beeinflußt und inwieweit unerwünschte Abhängigkeiten entstehen. Ein Beispiel für einen weiteren internationalen Aspekt hängt mit der Frage von Diskriminierung zusammen. Sie stellt sich unter anderem in Zusammenhang mit dem Atomwaffensperrvertrag einerseits und Exportbeschränkungen andererseits beziehungsweise mit der Frage, ob und inwieweit die in Industrieländern genutzte Kerntechnik modifiziert werden muß, um auch in Entwicklungsländern zur Anwendung kommen zu können.

Die Sozialverträglichkeit von Kernenergiesystemen kann durch eine Reihe von Faktoren beeinträchtigt werden, die Folge von staatlichen und betrieblichen Sicherheits- und Sicherungsbedürfnissen sind. Bei-

spielsweise können Vorsorgemaßnahmen gegenüber Spionage, Sabotage, Terrorismus, Instabilität usw. persönliche Freiheitsrechte und Arbeitnehmerrechte beeinträchtigen. Es gibt eine Fülle von Beispielen, in denen soziale Auswirkungen der Kernenergienutzung und der Kernenergiekontroverse wahrgenommen werden. Ebenfalls zahlreich sind die Bereiche, in denen soziale Auswirkungen untersucht oder beschrieben worden sind sowie die diesbezüglichen Publikationen.

Zur sozialen Verträglichkeit eines Energiesystems gehört auch die Frage, inwieweit wirtschaftliche und technische Strukturen soweit festgeschrieben sind, daß zukünftige Entwicklungen und Entscheidungen determiniert sind und Entscheidungsoptionen zukünftiger Generationen eingengt sind.

Der derzeitige Wissensstand über die internationale Verträglichkeit und die Sozialverträglichkeit wird in den Arbeiten im Studienkomplex A.4 nur gestreift und nicht in seiner repräsentativen Breite dargestellt. Dies hat vermutlich mehrere Ursachen. Zum einen sind bei den beauftragten Institutionen die entsprechenden Fachleute möglicherweise unterrepräsentiert. Zum anderen sind – insbesondere von Naturwissenschaftlern und Technikern – diese nichttechnischen Kriterien häufig schwerer definierbar und teilweise nicht quantitativ beschreibbar. Damit sind sie nicht in gleicher Weise handhabbar wie zum Beispiel rein technische Sicherheitskriterien oder strahlenbedingte Gesundheitsrisiken.

Die Koordinatoren können diese Situation lediglich feststellen und beschreiben, nicht aber eine eigene Darstellung dieser Bereiche abgeben. Sie können ferner darauf hinweisen, daß für eine vollständige Bewertung eines Energiesystems unter Berücksichtigung aller, auch der nichttechnischen Aspekte auch alle – positiven wie negativen – Effekte sozialer, gesellschaftlicher und politischer Art einzubeziehen sind.

Festzustellen ist, daß zur Bestimmung von Risiken hinsichtlich Sozialverträglichkeit und internationaler Verträglichkeit keine akzeptierten quantifizierenden Verfahren existieren, und daß eine Bewertung solcher Risiken bislang nicht anhand anerkannter und eindeutiger Kriterien erfolgt ist. Das bedeutet aber unter anderem auch, daß eine allgemeingültige Grundlage für einen vollständigen Vergleich von Risiken unter Einbeziehung aller zu betrachtenden Teilrisiken und Schadensarten nicht vorhanden ist.

### Proliferationsaspekte

Unter Proliferation ist die unerwünschte Weitergabe beziehungsweise Verwendung von Material, Anlagen und Know-how zu militärischen Zwecken zu verstehen. Die dazu verwendeten Materialien können entweder den militärischen oder dem zivilen Bereich der Kernenergienutzung entstammen. Die Verhinderung von Proliferation ist sowohl eine internationale Aufgabe als auch Aufgabe aller Staaten, die mit spaltbarem Material und mit sensitiven Anlagen umgehen. Zur Verhinderung eines Mißbrauchs zivilen Spaltmaterials zu militärischen Zwecken existieren internationale Kontrollen.

Es besteht Übereinstimmung, daß die Implementierung der Safeguard-Kontrollen der IAEA und der EURATOM ein politischer und diplomatischer Erfolg sind und daß die drohende Entdeckung von unerlaubten Abzweigungen der Verhinderung von Proliferation dient. Auf der anderen Seite können die internationalen Kontroll-Organisationen eine Abzweigung von spaltbarem Material nicht aktiv verhindern, sondern nur im Nachhinein mit einer gewissen Wahrscheinlichkeit entdecken. Die Methoden, die den Safeguard-Kontrollbehörden zur Verfügung stehen, lassen sich einteilen in

- die Bilanzierung („Accounting“) des zu überwachenden Materials,
- die Einschließung („Containment“) von Material und Anlagen sowie
- die Beobachtung („Surveillance“) sensitiver Bereiche und Vorgänge.

Die Wirksamkeit der Maßnahmen in ihrer Einzelwirkung und in ihrem Zusammenwirken ist sehr stark anlagenabhängig.

Einfluß auf das Proliferationsrisiko in bezug auf Art und Höhe haben nicht nur die Qualität administrativer Kontrollmaßnahmen, sondern besonders auch das politische Klima und die technischen Merkmale der genutzten Kernenergiesysteme. Die Motive für Proliferation können sehr unterschiedlich sein. Ziele für die Weitergabe können sein:

- der militärische Bereich des eigenen Landes (horizontale Proliferation),
- der militärische Bereich eines anderen Landes (vertikale Proliferation),
- Subnationale Gruppen,
- der Schwarzmarkt.

Weitergegeben beziehungsweise umgewidmet werden können beispielsweise:

- Spaltmaterialien wie Uran oder Plutonium,
- Kernphysikalische Hilfsmaterialien wie Tritium, Schweres Wasser oder Beryllium,
- Maschinen oder Maschinenteile, zum Beispiel Anreicherungscentrifugen, Tritiumabtrenneinrichtungen,
- Anlagen, zum Beispiel Anreicherungsanlagen,
- Know-how in Form von Ausbildung, Information oder Plänen, zum Beispiel im Bereich der Kernphysik, des Maschinen- und Anlagenbauers, der einschlägigen Chemie.

Den Safeguard-Kontrollen unterliegen allerdings nur Uran und Plutonium. Plutonium ist in allen Isotopenzusammensetzungen waffenfähig. Höhere Anteile an geradzahligem Isotopen, insbesondere an Plutonium-240, erfordern zwar technisch aufwendigere Waffenkonstruktionen oder vermindern die Vorhersagbarkeit der Quantität der Waffenwirkung. Sie erschweren aber nicht die prinzipielle Konstruktion einer Waffe mit diesem Material.

Die Kontrollen der IAEA gehen grundsätzlich auf den Atomwaffensperrvertrag vom 1. Juli 1968 zurück. Die

konkreteren Regelungen für die internationalen Kontrollen werden in einem sogenannten Verifikationsabkommen geregelt, das von der IAEA jeweils mit dem betreffenden Staat abgeschlossen wird. Die Reichweite der internationalen Kontrollaktivitäten ist jedoch begrenzt. Den Erfolgen des Vertrages und der IAEA-Tätigkeit bei der Verhinderung von Proliferation muß unter anderem gegenübergestellt werden, daß neben den Großmächten und der VR China inzwischen mindestens auch Argentinien, Brasilien, Indien, Pakistan, Israel, Südafrika und Nordkorea über Atomwaffen verfügen beziehungsweise diese herstellen können.

Unter Proliferationsgesichtspunkten sind Brennstoffstrategien am sensibelsten, bei denen ein direkter Umgang mit Spaltmaterialien in unverdünnter Form stattfindet. Andererseits ist derzeit keine vollständig proliferationsresistente Brennstoffstrategie existent oder in Entwicklung oder Planung. Insofern geht von der derzeitigen wie von für die Zukunft geplanter Kerntechnik immer ein Proliferationsrisiko aus. Der Aufbau eines umfangreichen zivilen Kernenergiesystems ist allerdings keine notwendige Voraussetzung für Herstellung oder Erwerb von Nuklearwaffen.

Welcher Stellenwert dem Proliferationsrisiko im Vergleich mit anderen Risiken oder Nutzen zukommt, ist eine Bewertungsfrage und hängt darüberhinaus neben technischen und administrativen Gegebenheiten auch von der Entwicklung der nationalen und internationalen Situationen und Beziehungen ab. Neben allen technischen und administrativen Maßnahmen wäre es politisch am wirkungsvollsten, den Anreiz für Proliferation zu eliminieren.

### **Integrale und vergleichende Risikobetrachtungen**

Integrale Risiko- beziehungsweise Sicherheitsbetrachtungen sind erforderlich, wenn nicht nur Einzelanlagen, sondern Kernenergie-Gesamtsysteme bewertet werden sollen. Eine Betrachtung des Gesamtsystems muß in zweierlei Hinsicht auf Vollständigkeit bedacht sein: Erstens müssen alle Prozesse und Anlagen des Gesamtsystems einschließlich der Versorgung mit Brennstoff, der Entsorgung der Abfälle und der gesamten zugehörigen Infrastruktur einbezogen werden. Zum zweiten müssen alle tatsächlichen oder potentiellen nachteiligen Folgen der jeweiligen Bestandteile des Gesamtsystems erfaßt werden und nicht nur eine bestimmte Auswahl wie zum Beispiel die häufig anzutreffende Begrenzung auf die Gesundheitsrisiken durch radioaktive Strahlung. Die zu betrachtenden weiteren Risiken wurden an anderer Stelle aufgezählt beziehungsweise beschrieben.

Bezüglich der bislang vorgelegten vergleichenden Risikobetrachtungen für verschiedene Gesamtsysteme zur Stromerzeugung bestehen in der wissenschaftlichen Diskussion tiefgreifende Dissense, was die Methodik, die Annahmen und die Daten angeht, die diesen Vergleichen zugrunde liegen. Bisher durchgeführte Risikovergleiche kommen zu numerischen Ergebnissen, die eine eindeutige Präferenz oder einen Ausschluß des einen oder anderen Energieträgers nicht zur Schlußfolgerung haben. Gemeinsam ist einigen Studien jedoch die Aussage, daß Kohle und Öl mit dem höchsten, Gas mit dem geringsten und dazwi-

schen Kernenergie und regenerative Energiequellen mit vergleichbaren numerischen Risikozahlen abschneiden, wenn man Todesfälle, Erkrankungen oder verlorene Arbeitstage bei Beschäftigten und in der Bevölkerung als alleinige Schadensarten betrachtet und das Produkt aus Eintrittshäufigkeit und Schadensausmaß als Risikomaß definiert. Beide Annahmen – die Schadensdefinition und die Produktformel – sind umstritten und machen derartige Risikovergleiche zu einem kontroversen Forschungsgegenstand.

Die erste vergleichende Risikountersuchung für den Stromerzeugungsbereich stammt aus dem Jahre 1974 (WASH-1224 in den USA). Die heftigste wissenschaftliche Kritik löste eine Studie von Inhaber (1978) aus, die relativ hohe Risikowerte für regenerative Energiequellen zum Ergebnis hatte. Sie gilt als überholt und wird heute weitgehend nicht mehr verwendet. Inzwischen liegt eine größere Anzahl vergleichender Untersuchungen vor, deren Ergebnisse eine große Spannweite aufweisen.

Von seiten der Kritiker bisheriger quantitativer Risikovergleiche wird gegen die vorgelegten Analysen eingewandt, daß sie sich größtenteils auf den Vergleich ausgewählter Gesundheitsrisiken beschränken und weil sie nicht quantifizierbare Risiken außeracht lassen. Weiterer entscheidender Einwand ist die willkürliche Definition des Risikos als Produkt aus Eintrittshäufigkeit und Ausmaß von Schäden und die rechnerische Reduzierung völlig unterschiedlicher Häufigkeiten und Schäden auf einige wenige, eindimensionale numerische Größen.

Neben den grundlegenden methodischen Einwänden bestehen bei der Durchführung von Risikovergleichen gravierende praktische Probleme, nämlich das Fehlen von wichtigem Datenmaterial und die hohe Sensitivität der Ergebnisse gegenüber geänderten Annahmen, Randbedingungen und Daten.

Neuere Risikovergleiche zwischen verschiedenen Stromerzeugungssystemen kommen zwar zu keinen eindeutigen Präferenzen für oder gegen ein bestimmtes Gesamtsystem, jedoch zu relativ günstigen Ergebnissen für die Kernenergieoption. Zu diesen Ergebnissen ist zu bemerken, daß bereits die Verwendung und realistischen Interpretation der Ergebnisse der Deutschen Risikostudie Kernkraftwerke, Phase B, die dargestellte Relation sich erheblich zu ungunsten der Kernenergie verschiebt. Ferner haben in Teilbereichen die Annahmen über die Back-up-Systeme einen erheblichen Einfluß auf die Ergebnisse. Desweiteren wird darauf hingewiesen, daß Teilrisiken aus den Stationen der Brennstoffkette nicht angemessen berücksichtigt wurden. Ansonsten gelten auch bezüglich neuerer Studien wie der IKE-Untersuchung die bereits genannten Methoden- und Daten-Defizite.

Die grundsätzlichen Probleme vergleichender Risikostudien lassen sich den drei Bereichen

- Ermittlung von möglichen Schäden,
- Vergleich unterschiedlicher Arten von Schäden und
- Betrachtung von Systemzusammenhängen zuordnen.

Weitgehend akzeptierte Methoden zum Vergleich von Risiken konkurrierender Systeme stehen derzeit nicht zur Verfügung. Da solche Vergleiche aber Grundvoraussetzung für eine angemessene und nachvollziehbare Entscheidungsfindung sind, wird hier ein fundamentaler theoretischer und praktischer Forschungsbedarf gesehen. Dies wird von den Autoren von Risikovergleichen meist auch eingestanden. Häufig wird auch davon abgeraten, beim derzeitigen Entwicklungsstand vergleichende Risikostudien zur Grundlage politischer Entscheidungen zu machen. Für klar definierte Teilbereiche können Risikovergleiche dagegen sinnvoll sein.

### **Akzeptanzaspekte und weitere Hemmnisse**

Hemmnisse im weitesten Sinne können zur Folge haben, daß die ermittelten wirtschaftlichen Potentiale nur zum Teil oder gar nicht ausgeschöpft werden. Der Teil des Potentials, dessen Realisierung unter Berücksichtigung der Hemmnisse erwartet wird, ist das Erwartungspotential. Daneben ist es auch möglich, daß Hemmnisse nicht nur die Verwirklichung des wirtschaftlichen Potentials behindern, sondern auch einen Einfluß auf das technische Potential haben. Hemmnisse können die technischen Prämissen bei der Potentialabschätzung verändern und reduzierend auf deren Ergebnisse wirken.

Gemeinhin wird mangelnde Akzeptanz als das zentrale Hemmnis für eine weitere, vor allem für eine verstärkte Kernenergienutzung angesehen. Akzeptanz ist im klassischen natur- oder ingenieurwissenschaftlichen Sinne nur schwer zu beschreiben und zu quantifizieren. Gleichwohl ist die Akzeptanzproblematik seit ca. 15 Jahren Gegenstand sozialwissenschaftlicher Forschung, insbesondere auch an den großen Kernforschungsanstalten. Trotz vieler Ansätze liegt eine abgesicherte Methodik zur „Messung“ von Akzeptanz und weiterer Hemmnisse nicht vor. Dennoch ist das Phänomen vorhanden; es kann daher weitgehend nur qualitativ beschrieben werden.

In einigen Ländern der Erde stößt die Nutzung der Kernenergie seit längerem auf erhebliche bis überwiegende Ablehnung durch die Bevölkerung. Seit kurzem nimmt diese ablehnende Haltung – von einigen wenigen Ausnahmen abgesehen – auch weltweit eher zu. Diese Beobachtung ist wiederum mit den derzeit verwendeten Methoden nicht quantitativ meßbar, sondern lediglich qualitativ angebar. Insbesondere spiegelt sich diese Tendenz nicht in Wahlergebnissen wider. Auch mit demoskopischen Mitteln konnten keine belastbaren Aussagen gewonnen werden.

Für die Bundesrepublik Deutschland gibt es Anzeichen, daß die seit ca. 15 Jahren latent vorhandene Akzeptanzkrise in den letzten Jahren verschärft wurde durch den Tschernobyl-Unfall und danach durch den Nukem/Transnuklear-Skandal und die Umstände des Bekanntwerdens des Störfalls im Kernkraftwerk Biblis A vom 16./17.12.87. Die beiden letztgenannten Ereignisse haben offensichtlich gerade auf konservative und traditionell kernenergiefreundliche Kreise gewirkt. Auch im Ausland haben Akzeptanzfragen in letzter Zeit eher zugenommen. Von wenigen

Ausnahmen abgesehen (zum Beispiel Frankreich), stehen inzwischen in fast allen Staaten der Welt, insbesondere in den USA, in der UdSSR und in Europa, Akzeptanzprobleme einer Ausweitung der Kernenergienutzung entgegen. Die Hintergründe für die jeweilige Akzeptanzproblematik sind in den einzelnen Ländern unterschiedlich und in der Regel nicht übertragbar. Teilweise werden die Akzeptanzprobleme begleitet von anderen Hemmnissen. Beispielsweise spielen in den USA der Harrisburg-Unfall sowie ökonomische und genehmigungstechnische Gründe eine besondere Rolle. In der UdSSR hat die zunehmende Ablehnung der Bevölkerung und die Einstellung von Kernkraftwerksprojekten neben den Konsequenzen des Tschernobyl-Unfalls vermutlich mit der Politik der Perestroika und dem Nationalitäten-Konflikt zu tun. In den meisten Entwicklungsländern ist das größte Hemmnis neben der Akzeptanzproblematik die mangelnde Finanzierbarkeit von großtechnischen Projekten. In einigen Industrieländern existieren Beschlüsse, von vorn herein auf Kernenergie zu verzichten (zum Beispiel Dänemark, Österreich) oder aus der Kernenergienutzung auszusteigen (zum Beispiel Italien, Schweden). In zahlreichen anderen Ländern besteht faktisch ein Moratorium.

Neben der Akzeptanzproblematik sind eine Reihe weiterer Hemmnisse in Betracht zu ziehen, die Auswirkungen auf die in Kapitel 3 abgeschätzten CO<sub>2</sub>-Minderungspotentiale haben. Solange die dort ermittelten Ergebnisse für die technischen Potentiale wesentlich durch die Zubaurate bestimmt sind, müssen die Hemmnisse untersucht werden, die zur Folge haben können, daß nicht ab 1997 zwei große Leichtwasserreaktoren pro Jahr ans Netz gehen werden. Zu unterscheiden sind Hemmnisse, die lediglich eine Verzögerung des Zubaus bewirken und Hemmnisse, die den Zubau von Leichtwasserreaktoren gänzlich verhindern können.

Unsicherheit besteht hinsichtlich der Entwicklungen in der Sicherheitsphilosophie, die zu geänderten und gegebenenfalls strengeren, möglicherweise mit bestehenden LWR-Konzepten nicht mehr zu erfüllenden Sicherheitsanforderungen führen können. Ferner besteht Unklarheit, ob und in welchem Umfang vom Gesetzgeber Änderungen des Atomgesetzes und Energiewirtschaftsgesetzes beschlossen werden und welchen Einfluß diese auf den Zubau von Leichtwasserreaktoren haben werden. Änderungen im Bereich der Regelungen für die Entsorgung von abgebrannten Brennelementen und von radioaktiven Abfällen sowie Verzögerungen und Engpässe bei Zwischen- und Endlagern müssen ebenfalls als mögliches Hemmnis in Betracht gezogen werden. Zu untersuchen wäre, ob genügend Standorte ausreichend schnell zur Verfügung stehen, die den – möglicherweise sich ändernden – Eignungskriterien genügen.

Schwer prognostizierbar sind die Gestaltung und Dauer zukünftiger Genehmigungsverfahren und die daraus erwachsenden Konsequenzen für den Zeitplan eines etwaigen Zubaus. Offen sind ferner, wie in Zukunft von Genehmigungsverfahren mit der Anordnung des Sofortvollzuges umgegangen wird und wie die zu erwartenden Klageverfahren entschieden werden.

Voraussetzungen für einen Zubau wäre ferner, daß die politischen Verhältnisse in Bund und Ländern für einen solchen energiepolitischen Weg gegeben sind, zumal parteipolitische Ausstiegsbeschlüsse bestehen.

Einen Zubau hemmen oder verhindern können energiepolitische Weichenstellungen, aufgrund derer kurz- beziehungsweise mittelfristig Atomkraftwerke keinen Platz mehr haben, sei es aus Gründen der begrenzten finanziellen Ressourcen oder aus Gründen des fehlenden Ersatz- oder Zubaubedarfs.

Ein Störfall oder ein Unfall in einer in- oder ausländischen Anlage kann dazu führen, daß ein Zubau, aber auch der Weiterbetrieb der derzeitigen Anlagen beendet wird.

Schließlich ist zu berücksichtigen, daß die in Kapitel 3 – bei der Ermittlung der Potentiale – zugrunde gelegten Zubaustrategien den raschen bis schnellstmöglichen Ausstieg aus Nutzung der Kohle zur Stromerzeugung darstellen. Es ist fraglich, ob die damit verbundenen strukturellen Änderungen und die resultierenden gesellschaftlichen Auswirkungen, insbesondere in den Kohleländern, in der unterstellten Zeit durchsetzbar sind. Insgesamt muß davon ausgegangen werden, daß der Potentialermittlung zugrundegelegte Zubau eine große Kraftanstrengung darstellt, der nur zu verwirklichen ist, wenn sie durch einen breiten gesellschaftlichen Konsens abgesichert ist, der nicht nur den Weiterbetrieb der derzeitigen Leichtwasserreaktoren, sondern auch explizit den weitgehenden Ausbau dieser Technologie mit allen Implikationen und Auswirkungen einschließt. Es ist fraglich, ob ein solcher Konsens in absehbarer Zeit erreichbar ist. Das Fehlen eines solchen Konsenses könnte ein unüberwindliches Hemmnis für einen Zubau von Kernkraftwerken sein.

Eine umfassende Hemmnisanalyse ist im Studienkomplex A.4. – der keine originären neuen Arbeiten, sondern nur eine Darstellung des derzeitigen Wissensstandes enthalten könnte – nicht erfolgt. Die bereits nach der qualitativen und vermutlich unvollständigen Darstellung von Hemmnissen verbleibenden Unsicherheiten sind so groß, daß eine solide Angabe eines Erwartungspotentials für den zukünftigen Beitrag der Kernenergie zur Minderung der CO<sub>2</sub>-Emissionen nicht möglich ist.

### **5.2.2 Argumente gegen die andernorts abgeschätzten Reduktionspotentiale durch den Einsatz von Kernenergie**

#### **Darstellung des Entwicklungsstandes und der Entwicklungsmöglichkeiten von Kernreaktoren**

Sowohl in Einzelbeiträgen zum Studienkomplex A.4. als auch in der zusammenfassenden Darstellung durch A. Voß wird ein deutlich zu optimistisches Bild sowohl des Entwicklungsstandes als auch der Entwicklungsmöglichkeiten von Kernreaktoren wiedergegeben. Dieses Bild wird garniert mit einseitigen, pauschalen und meist nicht zum Thema gehörenden Aussagen zur Sicherheit von Anlagen. Schließlich fehlt bei der Beschreibung des technischen und des

sicherheitstechnischen Standes bezüglich des Leichtwasserreaktors, daß auch bei Anlagen des Konvoi-Typs und der Baulinie '72 aufgrund ihrer Auslegungsmerkmale Unfallabläufe mit massiven Radioaktivitätsfreisetzungen (ca. die Hälfte der leichtflüchtigen Spaltprodukte nach wenigen Stunden) und dementsprechend mit schwersten Schäden in der weiteren Umgebung möglich sind. Ungeklärt sind die Randbedingungen für viele der diskutierten „Accident-Management-Maßnahmen“, ungelöst ist die Beherrschung des Wasserstoffproblems bei Unfällen in DWR-Anlagen.

Die Beschreibung des derzeitigen Entwicklungsstandes bringt nicht zum Ausdruck, daß der größte Teil des derzeitigen Kernkraftwerksparks diesem Stand nicht entspricht. Altanlagen weisen teilweise erhebliche sicherheitstechnische Unterschiede zu den Anlagen des Konvoi-Typs (DWR) oder zu den beiden Anlagen der Baulinie '72 (SWR) auf.

Ferner fehlt bei der Beschreibung des technischen und des sicherheitstechnischen Standes bezüglich des Leichtwasserreaktors, daß auch bei Anlagen des Konvoi-Typs und der Baulinie '72 aufgrund ihrer Auslegungsmerkmale Unfallabläufe mit massiven Radioaktivitätsfreisetzungen (ca. die Hälfte der leichtflüchtigen Spaltprodukte nach wenigen Stunden) und dementsprechend mit schwersten Schäden in der weiteren Umgebung möglich sind. Ungeklärt sind die Randbedingungen für viele der diskutierten „Accident-Management-Maßnahmen“, ungelöst ist die Beherrschung des Wasserstoffproblems bei Unfällen in DWR-Anlagen.

Bezüglich der HTR-Anlagen ist festzustellen, daß der THTR-300 auch aus (betriebs-)technischen Gründen stillgelegt wurde und daß weltweit derzeit kein kommerzieller HTR in Betrieb ist. In vielen Fällen ist der Nachweis bestimmter HTR-spezifischer Sicherheitseigenschaften noch nicht erbracht. Der Hinweis, bei Brutreaktoren seien Schwierigkeiten fast nur im nicht-nuklearen Anlagenbereich aufgetreten, ist insofern irreführend, als Störungen im nicht-nuklearen Bereich zu Rückwirkungen auf den Kern führen können und somit durchaus sicherheitsrelevant sein können. Die optimistische Darstellung der Entwicklungsmöglichkeiten kann nicht darüber hinwegtäuschen, daß die meisten beschriebenen Konzepte lediglich auf dem Papier existieren und daß ihre großtechnische Einführung in absehbarer Zeit — zumindest bis zum Jahre 2005 — nicht erwartet werden kann. Für die gesamte Konstruktions-, Bau- und Erprobungsphase im Prototyp — und im Demonstrationsanlagenmaßstab sowie für die Phase der Entwicklung zur Serienreife müssen längere Zeiträume veranschlagt werden, selbst wenn man keine Rückschläge in der Entwicklung unterstellt. Nach den bisherigen Erfahrungen mit der HTR-Entwicklung, der Brüter-Entwicklung, der Wiederaufarbeitung, der Endlagerung, der Nachrüstung von Leichtwasserreaktoren muß aber auch in Zukunft mit Rückschlägen gerechnet werden. Wenn überhaupt die Entwicklung neuer Reaktorkonzepte in Angriff genommen werden sollte, so ist zu erwarten, daß sich die Arbeiten in internationaler Kooperation auf sehr wenige Konzepte konzentrieren wird, die sich erst nach einem längeren Wettstreit herauskristallisieren werden.

### **Technische Reduktionspotentiale durch Maßnahmen in Naher Zukunft (bis zum Jahr 2005)**

Die ermittelten technischen Potentiale durch den Zubau von Leichtwasserreaktoren werden quantitativ im wesentlichen durch die Festlegungen des Referenzszenarios und durch die angenommenen Zubauraten andererseits bestimmt beziehungsweise begrenzt.

Im Rahmen der hier dargelegten Argumente ist das Referenzszenario solange von untergeordneter Bedeutung, wie die Kernkraftwerks-Zubaurate die limitierende Einflußgröße ist, das heißt solange fossil befeuerte Kraftwerke ersetzt werden können. Die technischen Potentiale können sich rechnerisch jedoch drastisch ändern, wenn bestimmte Annahmen des Referenzszenarios geändert werden, beispielsweise

- höhere Lebensdauer der zu ersetzenden fossilen Anlagen,
- geringere Lebensdauer der bestehenden Atomkraftwerke.

Weitere Faktoren, die das technische Potential mindern können, sind

- Energieversorgungsstrategien, die wesentlich von den Annahmen des Referenzszenarios abweichen.
- Technisch bedingte Verzögerungen beim Zubau von Leichtwasserreaktoren,
- Neue Sicherheitsanforderungen an neu zu erbauende Anlagen, die sich aus Erkenntnissen des Betriebs oder der Reaktorsicherheitsforschung ergeben können oder die aufgrund der größeren Zahl von Anlagen für erforderlich gehalten werden. Es ist im übrigen völlig unrealistisch, davon auszugehen, daß ab 1997 ein beziehungsweise zwei Leichtwasserreaktoren in Betrieb gehen können. Aufgrund bisheriger Erfahrungen beträgt die Gesamtzeit von Antragstellung, Begutachtung, Genehmigung, Bau bis Inbetriebnahme auch bei zügigster Abwicklung mindestens 10 Jahre, auch bei den Konvoi-Anlagen.
- Ferner ist hinsichtlich des neuen Prognos-Szenarios „Die energiewirtschaftliche Entwicklung in der Bundesrepublik Deutschland (ohne ehemalige DDR) bis zum Jahr 2010“ zu sagen, daß die Kernkraftwerks-Ausbaustrategie also auch bei einem Vergleich mit dem neuen PROGNOSESzenario realitätsfern ist und nichts mit einem technisch vernünftigerweise realisierbarem Potential zu tun hat.
- Eine Atomkraftwerks-Kapazität von 45 000 MW stößt im übrigen auch an andere technische Grenzen, zum Beispiel wegen des Mangels geeigneter Standorte (Kühlwasserangebot, Durchführbarkeit von Katastrophenschutzmaßnahmen, usw.).

Die der Auskoppelung von Fernwärme aus Atomkraftwerken zur Substitution von fossilen KWK-Anlagen ist besonders ineffizient, da gerade dort fossile Energieträger substituiert werden sollen, wo sie sehr effizient eingesetzt werden.

Weiterhin ist die Einbindung von Atomkraftwerken in Fernwärmenetze mit dem Bau von großen Antransportleitungen verbunden, da die Kernkraftwerke weit von den Fernwärmenetzen stehen, was aus wirtschaftlichen Gesichtspunkten sehr negativ zu beurteilen ist, und weshalb auch derzeit keine Fernwärmeumkoppelung aus Atomkraftwerken erfolgt. Oftmals ist kein Kernkraftwerk in der Nähe (bis 30 km) von großen Fernwärmenetzen, weshalb das Potential sehr begrenzt ist. Die Fernwärmeversorgung aus kleineren Heizreaktoren ist ebenfalls ineffizient, da ein Bau in Ballungszentren bislang nicht möglich ist. Insgesamt existiert nach einer Untersuchung des Öko-Institutes ein Einsatzbereich von max. 4 HTR (200 MWth) in der Bundesrepublik Deutschland, wobei Sicherheitsfragen nicht berücksichtigt wurden.

Der Einsatz von Atomkraftwerken zur Fernwärmeversorgung würde im Betrachtungszeitraum moderne Kohletechnik mit entsprechenden Abgasreinigungsanlagen verdrängen, was unter Effizienzgesichtspunkten Unsinn ist. Weiterhin ist gerade der KWK-Bereich dasjenige Einsatzgebiet für die Kohle, in dem sie am umweltverträglichsten eingesetzt werden kann.

Industrielle Prozeßdampf- und Prozeßwärmeerzeugung einschließlich Kohleveredelung.

Die Zubauraten für HTR-Modul-Reaktoren (ca. 10 Anlagen pro Jahr ab 1997) sind aus technischen, organisatorischen, kapazitätsbedingten, industriepolitischen, genehmigungstechnischen und ökonomischen Gründen aus utopisch anzusehen.

Die ursprüngliche Erwartung an die HTR-Entwicklung, ein hohes Temperaturniveau des Kühlgases zu erreichen (größer 950 Grad Celsius), ist bei den beiden Prototypen konzeptionell nicht realisiert worden. Lediglich bei dem AVR-Versuchsreaktor sind derart hohe Temperaturen des Kühlgases erreicht worden. Weiterhin ist die Erforschung von Werkstoffen und entsprechender Komponenten zur Übertragung der Prozesswärme noch im Versuchsstadium. Vor der Jahrhundertwende ist bei realistischer Betrachtung der Situation nicht mit dem Bau eines Prototyps zur Realisierung „Nuklearer Prozesswärmeauskoppelung“ zu rechnen.

Bisherige Analysen der potentiellen Einsatzchancen des HTR als reinem Stromerzeuger sowie im Nieder-temperaturwärmemarkt als Heizkraft- oder Heizwerk haben ergeben, daß bis zum Jahr 2000 kein ökonomisch begründbares Potential besteht, selbst wenn optimistische Daten für die wirtschaftlichen und technischen Merkmale des Systems angenommen werden.

Zunächst sind Kernenergiesysteme nicht frei von Emissionen an CO<sub>2</sub> und anderen Spurengasen (zum Beispiel Krypton). Darüber hinaus konkurriert der Einsatz von Kernkraftwerken in den verschiedenen Anwendungsbereichen in allen Fällen mit effizienten Nutzungstechnologien und mit regenerativen Energiequellen. Insbesondere muß beachtet werden, daß der Einsatz von großen LWR oder HTR zur Stromerzeugung strukturelle Effekte bedingt, die immer auch zu einem höheren Einsatz von fossilen Energieträgern tendieren, verglichen mit einer Effizienzstrategie, die

mit dem Einsatz von dezentralen Umwandlungstechnologien, besonders auf regenerativer Basis, verbunden ist.

Die Schätzungen für die Stromerzeugungskosten bei Leichtwasserreaktoren sind mit einer Reihe von Unsicherheiten behaftet, die sich erheblich auf die Abschätzung der wirtschaftlichen Potentiale auswirken können. Die dort zugrundegelegten Kosten für die Stromerzeugung aus Kernenergie, Braunkohle und Importkohle liegen derart dicht beieinander, daß Änderungen in den Kostenschätzungen die Potentialabschätzungen und -relationen grundlegend ändern können.

Des weiteren ist festzustellen, daß bestimmte Kosten nicht berücksichtigt worden sind. Zu nennen sind die energiewirtschaftlichen und energietechnischen Systemkosten, die mit dem Betrieb von Atomkraftwerken mit Blockgrößen von bis zu 1300 MWel verbunden sind und die u. a. durch die Anforderungen an das Hochspannungsverbundnetz und die Sofortreserve entstehen. Ferner gibt es Kostenfaktoren, die derzeit nicht bekannt sind, zum Beispiel die Kosten für die Endlagerung und für den Abriß kerntechnischer Anlagen.

Im Prinzip können die Unsicherheiten zu einer Erhöhung und zu einer Verringerung der Kosten führen. In Kapitel 3 Nr. 1 sind jedoch eine Reihe von optimistischen Annahmen getroffen, die eher zu einer Unterschätzung der Stromerzeugungskosten aus Leichtwasserreaktoren führen. Diese Annahmen betreffen

- die Lebensdauer
- die Anlagekosten
- die Nachrüstmaßnahmen
- die Wartung- und Instandhaltung
- die Anlagenverfügbarkeit
- die Schätzungen der Abriß-Kosten
- die Stilllegungsphase
- die Anlagengröße
- die Kostensteigerungen
- die Standardisierung
- die externen Kosten.

Zu externen Kosten gibt es neuere Untersuchungen aus dem In- und Ausland, die zu völlig anderen Ergebnissen kommen, nämlich daß die externen Kosten wesentlich zu den Stromerzeugungskosten aus Leichtwasserreaktoren beitragen würden und daß die externen Kosten für Kernenergie relativ am höchsten liegen. Der größte Einzelbeitrag rührt dabei von den Kosten eines Unfalles mit Kernschmelze her. Neuere Ergebnisse der Reaktorsicherheitsforschung und Erkenntnisse nach dem Tschernobyl-Unfall weisen in die gleiche Richtung. Jüngere sowjetische Schätzungen kommen auf Beträge von ca. 200 Milliarden Rubel allein durch Ausfälle bei der Strom- und landwirtschaftlichen Produktion als Folge des Tschernobyl-Unfalls. Untersuchungen zu den externen Kosten wurden u. a. durchgeführt von Hohmeyer, Shuman und Cavanagh, Ottinger et al..

### 5.2.3 Die zentralen Aussagen von Klaus Traube zu den technischen und wirtschaftlichen Potentialen der Minderung von Spurengasemissionen durch Kernenergie

Im Rahmen der Arbeitspakete A.4.1 und A.4.2 des Studienschwerpunktes A.4 (Kernenergie, vgl. Kap. 6) erhielt Prof. Dr. Klaus Traube den Auftrag, die Arbeiten zu den technischen und wirtschaftlichen Potentialen zu kommentieren. Traubes zentrale Feststellungen werden im folgenden im Zusammenhang dargestellt.

Das IKE weist in seinem Berichtsteil zur Kernenergie technische und wirtschaftliche Potentiale für die folgenden Anwendungsgebiete aus:

- Elektrizitätserzeugung mit Leichtwasserreaktoren (LWR)
- Fernwärmeerzeugung durch Auskopplung aus LWR oder mit Heizreaktoren
- Prozeßdampf- oder Prozeßwärmeerzeugung mit Hochtemperaturreaktoren (HTR).

Diese Bereiche werden von Traube kritisch untersucht. Nicht betrachtet werden Bereiche, für die IKE zwar technische Potentiale ermittelt hat, sie jedoch selbst für unwirtschaftlich erachtet:

- Veredelung fossiler Brennstoffe
- Wasserstofferzeugung mit Kernenergie
- Stromerzeugung mit HTR
- Schnelle Brutreaktoren (SBR)

#### Stromerzeugung mit Leichtwasserreaktoren

IKE behauptet hier ein kurzfristig realisierbares Potential von 21 bis 25 TWh Stromproduktion pro Jahr durch verstärkte Auslastung der existierenden Kernkraftwerke. Dem entsprächen jährlich 20 bis 27 Millionen Tonnen vermiedener CO<sub>2</sub>-Emissionen. Um dies zu erreichen, müsse nur die Arbeitsausnutzung der KKW von ihrem heutigen Wert um 6 bis 8%-Punkte auf etwa 85 % (= 7450 Jahresvollaststunden) angehoben werden.

Traube argumentiert, daß dies technisch nicht möglich sei, wie sich bei der Betrachtung der realen Gegebenheiten zeige. Im Jahr 1987 betragen die

- Arbeitsausnutzung  
77,6 % = 6800 Vollaststunden
- Arbeitsverfügbarkeit  
81,5 % = 7140 Vollaststunden
- Zeitverfügbarkeit  
85,2 % = 7460 Vollaststunden.

IKE hat also ohne weitere Erläuterung eine Anhebung der Arbeitsausnutzung auf den Wert der Zeitverfügbarkeit angesetzt. Die Arbeitsverfügbarkeit markiert jedoch per Definition die Obergrenze der möglichen Arbeitsausnutzung der Kernkraftwerke. Sie lag im langjährigen Mittel für alle bundesdeutschen Anlagen bei etwa 75 %. Nur einmal, 1985, erreichte sie 85 %.

Der Unterschied zwischen Arbeitsverfügbarkeit und Arbeitsausnutzung beruhte 1987 nicht auf den Kohleabnahmeverpflichtungen des Jahrhundertvertrages, wie IKE suggeriert. Im Gegenteil gehörten jene Reaktoren, deren Arbeitsverfügbarkeit nicht ausgenutzt wurde, gerade solchen Betreibern, die gleichzeitig Braunkohle (RWE) oder Importkohle (PreußenElektra, HEW) verstromten. Dazu jedoch verpflichtete sie niemand. Ob im Vergleich zu Braunkohle und Importkohle höhere Betriebskosten der Kernkraftwerke oder die Netzverhältnisse dazu führten, ist nur den Betreibern bekannt.

Festzuhalten bleibt, daß die Arbeitsausnutzung nicht über die Arbeitsverfügbarkeit gesteigert werden kann, und diese im langjährigen Mittel nicht über 80 % liegen dürfte. Eine noch höhere Arbeits- und Zeitverfügbarkeit muß zu Lasten des Sicherheitsstandards der deutschen Kernkraftwerke gehen. Damit sind allenfalls etwa 10 TWh pro Jahr an Mehrerzeugung und etwa 10 Millionen Tonnen CO<sub>2</sub> pro Jahr an Emissionsminderung technisch und möglicherweise wirtschaftlich erreichbar.

Das Institut für Kernenergetik u. Energiesysteme (IKE) errechnet eine mögliche CO<sub>2</sub>-Emissionsminderung von bis zu 90 Millionen Tonnen pro Jahr, falls ab 1997 jährlich ein Kernkraftwerk zusätzlich in Betrieb geht, beziehungsweise bis zu 145 Millionen Tonnen pro Jahr, falls ab 1997 jährlich zwei Reaktoren zusätzlich in Betrieb gehen. Die Stromerzeugung in Leichtwasserreaktoren (LWR) sei billiger als diejenige aus Importkohle oder Braunkohle. Das technische Potential sei daher mit dem wirtschaftlichen identisch. Dagegen argumentiert Traube wie folgt:

Bereits das technische Potential ist jedoch mit falschen Voraussetzungen ermittelt. Es geht zunächst von einer stark auf jährlich 530 Terawattstunden (TWh) brutto erhöhten Stromerzeugung aus (1987: 418 TWh). Davon sind insgesamt 343 TWh Atomstrom, erzeugt von 45,7 GW Kernkraft-Kapazität in Grundlast (7500 h pro Jahr). Die neu zugebauten Kernkraftwerke bewirken dann die genannten 145 Millionen Tonnen Einsparung von den CO<sub>2</sub>-Emissionen des Jahres 2005. Bezogen auf die Emissionen des Jahres 1987 beträgt die CO<sub>2</sub>-Minderung dagegen nur etwa 50 Millionen Tonnen. Die zugebauten Reaktoren decken also vorwiegend den erhöhten Strombedarf.

Unmöglich ist die mittlere Ausnutzung von 7500 h pro Jahr nicht nur aus technischen Gründen (vgl. oben), sondern auch, weil der Atomstrom-Anteil von fast 70 % über dem zu erwartenden Anteil der Grundlast im Jahre 2005 (50 bis 60 %) liegt. Die Kernkraftwerke müßten daher in der Mittellast eingesetzt werden (ca. 4000 h pro Jahr). Die Kernenergie würde dabei allerdings existierende Braunkohle- und Steinkohlekraftwerke in die Mittellast beziehungsweise obere Mittellast verdrängen und so deren Kapitalkosten teilweise vernichten; diese Kosten wären der Kernenergie zuzurechnen.

Zu bezweifeln ist ferner der Zeitpunkt 1997 für die Inbetriebnahme der ersten Anlagen. Auch bei den Konvoi-Anlagen betrug der für Planung, Antragstellung, Genehmigung und Bau notwendige Zeitraum etwa 10 Jahre. Hinzu kommen fehlende Produktionskapazitäten für Großkomponenten von Leichtwasser-



reaktoren (zum Beispiel Reaktordruckbehälter). Schließlich ist die Zahl möglicher Standorte begrenzt.

Maximal technisch möglich erscheint somit der Zubau von 5 Anlagen mit zusammen 6,5 Gigawatt (GW) Kapazität bis 2005. Dabei ist allerdings zu berücksichtigen, daß 8,5 GW Kernenergiekapazität vor 1980 in Betrieb genommen wurden. Sie müssen bis zum Jahr 2005 ersetzt werden, falls sie die seither in der Literatur genannte Lebensdauer von 25 Jahren erreichen.

In diesem Fall verbleibt überhaupt kein technisches Potential zur CO<sub>2</sub>-Emissionsminderung durch den Zubau von Leichtwasserreaktoren.

Wirtschaftlich wäre dies ohnehin nicht.

Zunächst ist eine drastische Verringerung des Strombedarfs durch effizientere Techniken zur Stromnutzung zu geringeren volkswirtschaftlichen Kosten als eine Ausweitung des Stromangebots durch den Ausbau der Kernenergie möglich. Allein im Haushaltsbereich ließen sich etwa 30 TWh pro Jahr zu geringeren Kosten einsparen. Aber auch zur Deckung des verbleibenden Strombedarfs gibt es kostengünstigere Erzeugungstechniken als Leichtwasserreaktoren.

Den von IKE errechneten Stromerzeugungskosten liegen u. a. folgende Annahmen zugrunde:

- um 10 % gegenüber den Konvoi-Anlagen verminderte Baukosten der LWR (sowie eine Reduktion der Bauzeit von 6 auf 5 Jahre)
- um 20 % gegenüber dem VDEW-Stromkostenvergleich 1987 erhöhte Baukosten für Steinkohle- und Braunkohlekraftwerke
- 35 Jahre Lebensdauer für alle Kraftwerkstypen.

Eine so lange Lebensdauer wurde noch für keinen zivilen LWR demonstriert. (Dagegen sind weltweit mindestens 24 Kernkraftwerke vor dieser Zeit stillgelegt worden, im Mittel nach etwa 15 Jahren.) Realistisch erscheint dagegen sowohl für LWR wie für fossile Kraftwerke eine Nutzungszeit von 20 Jahren, die auch von VDEW zugrundegelegt wird. Wegen der höheren Baukosten wirkt sich die Annahme einer überhöhten Nutzungszeit beim Kernkraftwerk stärker positiv aus als beim fossilen Kraftwerk.

Mit den Annahmen von VDEW zu Baukosten, Betriebskosten und Nutzungszeit und den Daten aus dem gemeinsamen Analyseraster errechnet sich kein Kostenvorteil der Kernenergie, sondern ein Nachteil von 10 % gegenüber Importkohle in der Grundlast beziehungsweise 20 % in der Mittellast und gegen Braunkohle.

Es gibt daher kein wirtschaftliches Potential für den Zubau von Leichtwasserreaktoren zur Stromerzeugung.

Die volkswirtschaftlich günstigste Alternative zum Ausbau der Kernkraft ist bei gegebenem Strombedarf im übrigen nicht die Kondensationsstromerzeugung aus Braunkohle oder Steinkohle, sondern der Ausbau der Kraft-Wärme-Kopplung auf Basis von Erdgas und Steinkohle. Eine realistische KWK-Ausbaustrategie spart zudem ebenfalls 70 % der durch die gleiche

Menge Atomstrom möglichen CO<sub>2</sub>-Minderung ein und ermöglicht höhere Emissionsminderungen bei verschiedenen Schadstoffen und Klimagasen.

### Nukleare Fernwärmeerzeugung

IKE ermittelt hier ein technisches Potential von 7 bis 16,5 Millionen Tonnen CO<sub>2</sub>-Minderung durch Auskopplung von Fernwärme aus LWR und Einspeisung in bestehende Fernwärmenetze und durch Kernheizwerke. Davon seien 0,8 bis 3,5 Millionen Tonnen CO<sub>2</sub> pro Jahr gegebenenfalls wirtschaftlich erreichbar.

Im Widerspruch hierzu wird im Szenario mit Kernenergieausbau eine Reduktion von 12,6 Millionen Tonnen CO<sub>2</sub> pro Jahr als wirtschaftlich ausgewiesen.

Im einzelnen lautet Traubes Argumentation hierzu wie folgt:

Technisch ist dies möglich. Sinnvoll ist die Einspeisung nuklearer Fernwärme in bestehende Netze zur Substitution fossiler Heizkraftwerke nicht, denn dadurch wird gerade die effizienteste Technik zur Nutzung fossiler Energien ersetzt.

Als wirtschaftlich bezeichnet IKE eine Einspeisung in die bestehenden Fernwärmenetze von Hamburg, Mannheim und Stuttgart. Diese Wirtschaftlichkeit ergibt sich jedoch nur aufgrund eines methodisch falschen Vorgehens. IKE vergleicht die Kosten für den Fernwärme-Transport und die variablen Kosten der Fernwärme-Produktion im Kernkraftwerk (d. h. die Kosten der Stromeinbuße durch die Wärmeauskopplung) mit den Vollkosten eines Kohle-Heizkraftwerks, welche mit 47 DM/MWh obendrein viel zu hoch angesetzt sind.

Richtig wäre jedoch bei kurzfristiger Betrachtung der Einspeisung in bestehende Netze ein Vergleich mit den variablen Kosten des fossilen Heizkraftwerks; schon die Kosten der Verbindungsleitung vom Reaktor zum Fernwärmenetz sind in allen Fällen höher. Bei langfristiger Betrachtung wäre dagegen ein Vergleich mit den Vollkosten sowohl des LWR wie des HKW angebracht.

Die Fernwärme-Auskopplung aus LWR ist daher unwirtschaftlich. Andernfalls hätten die Betreiber der Fernwärmenetze in Hamburg und Stuttgart sicher schon Wärme aus den ihnen gehörenden Reaktoren ausgekoppelt. Die Möglichkeit der Fernwärme-Auskopplung wurde im übrigen für alle neueren Kernkraftwerke in der Bundesrepublik Deutschland geprüft und für unwirtschaftlich befunden.

In der westlichen Welt existiert kein kommerzielles Kernheizwerk, nicht einmal ein Demonstrationsprojekt. Es existieren auch keine Produktionsanlagen dafür. Die technische Realisierung einer Großserienfertigung bis zum Jahre 2005 ist daher mehr als fraglich. Umsomehr sind auch die von IKE genannten Baukosten als spekulativ zu beurteilen. Sie beruhen auf den Angaben interessierter Hersteller, die nach aller Erfahrung zu niedrig sind.

Wiederum sind die Wärmegestehungskosten der zum Vergleich betrachteten Heizkraftwerke überhöht an-

gesetzt. So wurde u. a. eine unsinnig niedrige Stromkennzahl von  $< 0,25$  angenommen.

Schließlich dürften Kernheizwerke in Wohngebieten oder deren unmittelbarer Nähe auf eine besonders geringe Akzeptanz stoßen. Es bleibt festzuhalten, daß es kein wirtschaftliches Potential für nukleare Fernwärmeerzeugung gibt.

### **Prozeßdampf- und Prozeßwärmeerzeugung mit Hochtemperaturreaktoren (HTR)**

IKE hält den Bau von 50 Doppelblockanlagen (2.200 MWth wegen Reservehaltung) und eine CO<sub>2</sub>-Reduktion von 35 Millionen Tonnen pro Jahr für technisch möglich. Wirtschaftlich seien davon 30 Doppelblockanlagen, die 24 Millionen Tonnen CO<sub>2</sub> einsparten. In einer Strategie, die Strom aus industrieller Kraft-Wärme-Kopplung durch Atomstrom aus LWR ersetzt, ist es nur logisch, die dann nicht mehr gedeckten Nutzenergien Prozeßdampf und -wärme ebenfalls nuklear zu erzeugen.

Der Wunschkandidat dafür, der Hochtemperaturreaktor, ist allerdings für diese Anwendung ebensowenig technisch demonstriert, wie seine Kosten bekannt sind. Bekannt sind nur die Kostenschätzungen interessierter Hersteller.

Der Bau einer derart großen Anzahl von Anlagen ist daher bis zum Jahr 2005 technisch unmöglich. Unklar ist auch, ob die genannte Anzahl von Standorten gefunden werden kann. Die Studienergebnisse, auf die sich IKE hierbei bezieht, sind wenig belastbar. Eine schnelle Einführung würde zudem einen volkswirtschaftlich unsinnigen Aufwand für die Entwicklung und Demonstration dieser Technik und der dazugehörigen Infrastruktur wie zum Beispiel Brennelementfertigung erfordern.

Die volkswirtschaftlich sinnvolle Alternative ist dagegen der Ausbau der industriellen Kraft-Wärme-Kopplung in moderner Erdgas- und Kohletechnik.

Zusammenfassend ist Traube zufolge zu resümieren, daß ein nennenswertes technisches Potential der CO<sub>2</sub>-Emissionsminderung durch Kernenergie bis zum Jahr 2005 nur für eine Ausweitung der Stromerzeugung im Leichtwasserreaktor besteht. Eine solche Strategie ist jedoch im Vergleich zur effizienteren Nutzung von Strom und zum Ausbau der Kraft-Wärme-Kopplung auf Erdgas- und Kohle-Basis unwirtschaftlich. Dies zeigt sich auch daran, daß VDEW in ihrer Stellungnahme zu den Möglichkeiten der CO<sub>2</sub>-Reduktion in der Elektrizitätswirtschaft einen Zubau von Kernkraftwerken nur bei staatlicher Unterstützung im Rahmen eines „Crash-Programms“ für möglich erachtet.

### **5.3 Bewertung der Möglichkeiten zur Verminderung der Kohlendioxid-Emissionen durch Atomenergie von Prof. Dr. Meyer-Abich und Prof. Dr. Heinloth**

Die Kommission hat in ihrem ersten Zwischenbericht empfohlen zu prüfen, „ob beziehungsweise in welchem Umfang die Kernenergie national und weltweit einen Beitrag zur Eindämmung des Treibhauseffekts

leisten kann“. Bei dieser Prüfung sei, wie bei allen anderen Energietechnologien auch, „nicht nur das Kriterium der Klimaverträglichkeit zugrunde zu legen“ (S. 504 vgl. Nr. 10). Alle Möglichkeiten zur Verminderung der CO<sub>2</sub>-Emissionen haben ihren Preis und sind daraufhin je für sich und komparativ zu bewerten. Eine solche Möglichkeit ist grundsätzlich auch die Atomkernenergie. Also verdient sie eine gleichermaßen faire Bewertung wie die anderen, wieweit die durch sie erzielbaren CO<sub>2</sub>-Reduktionen ihren Preis – den wirtschaftlichen Preis und die übrigen gesellschaftlichen Kosten – wert ist.

Eine Bewertung der Nutzung der Atomkernenergie wird dadurch erschwert, daß diese Energietechnik ihren Befürwortern wie ihren Gegnern seit Anfang der 70er Jahre zum Paradigma – oder zur Pioniertechnik – für eine Entwicklung der industriellen Wirtschaft geworden ist, welche die einen entschieden wollen und die anderen zugunsten alternativer Techniken ebenso entschieden ablehnen. Die Enquete-Kommission „Zukünftige Kernenergiepolitik“ hatte 1980 einen Weg gewiesen, wie in der Öffentlichkeit der Konsens wiedergefunden werden könnte. Die politischen Verantwortlichen sind diesen Weg nicht gegangen.

Im Lauf der 80er Jahre und besonders durch den Kernschmelzunfall in Tschernobyl im April 1986 hat sich die öffentliche Meinung in der Bundesrepublik Deutschland wie auch in anderen Ländern zu Ungunsten der Atomkernenergienutzung verschoben. Der „Atom Müll“-Skandal 1987/88 hat überdies seit langem entwickelte Bedenken gegen die Sozialverträglichkeit der Atomkernenergie bestätigt und einer breiten Öffentlichkeit veranschaulicht. Viele Bürger hierzulande bewerten diese Energietechnik in ihrer jetzigen Form wegen des unverantwortlich hohen Schadensausmaßes bei sehr großen Unfällen mittlerweile als eine Übergangstechnik. Die Auseinandersetzung konzentriert sich nun auf die Frage, wie lange dieser Übergang noch dauern soll beziehungsweise, ob betriebsmäßig inhärent sichere Anlagen entwickelt werden können, bei welchen auch im schlimmsten Schadensfall die Umweltbelastungen ein vertretbares Maß nicht übersteigen. Wir halten ungeachtet dieser generellen Einschätzung daran fest, daß die Atomkernenergie angesichts der bedrohlichen Klimaveränderung eine neuerliche Bewertung verdient. Fast ein Drittel der jährlichen CO<sub>2</sub>-Emissionen stammt aus der Elektrizitätserzeugung (232 von 715 Millionen Tonnen 1987) und dieser Anteil würde im Referenzfall bis 2005 auf über die Hälfte ansteigen (327 Millionen Tonnen von 695 Millionen Tonnen). Gerade zur Produktion von elektrischem Strom aber wird die Atomkernenergie bisher (praktisch ausschließlich) genutzt. Diejenigen, die darauf verzichten wollen, müssen also das Klimaargument zusätzlich berücksichtigen. Prinzipiell besteht außerdem die Möglichkeit, den Anteil der atomkernentechnisch betriebenen Kraftwerke über das bisherige Drittel hinaus zu erhöhen.

Ob und in welchem Umfang die Atomkernenergie zur Reduktion der CO<sub>2</sub>-Emissionen akzeptabel ist, hängt vor allem davon ab, wieweit den mit ihrer Nutzung verbundenen spezifischen Gefahren begegnet werden kann. Auch die Klimakonferenz von Toronto (1988) hat ein „revisiting (of) the nuclear power op-

tion, which lost credibility because of problems related to nuclear safety, radioactive waste, and nuclear weapons proliferation“ für angezeigt gehalten, jedoch nur unter der Bedingung, daß „these problems can be solved, through improved engineering designs and institutional arrangements“. Zu berücksichtigen ist also nicht nur der jetzige Stand der Atomkerntechnik, sondern die Frage ist vor allem, wieweit derzeitige und künftige Entwicklungen über diesen Stand hinaus zu führen versprechen.

Die Enquete-Kommission „Zukünftige Kernenergiepolitik“ des Deutschen Bundestages hat 1979 einstimmig empfohlen, die Akzeptabilität technischer Entwicklungen und insbesondere der Atomkernenergie an den folgenden Kriterien zu bemessen:

(1) Wirtschaftlichkeit, und zwar so verstanden, daß die Energiepreise die Wirtschaftskraft eines Landes stärken sollen, was auch für teure Energie sprechen kann, wenn durch niedrige Energiepreise nur rückläufige Wirtschaftszweige (etwa in der Grundstoffindustrie) subventioniert und wünschenswerte Strukturwandlungen verzögert werden. Gerade in wirtschaftlich erfolgreichen Ländern bestehen relativ hohe Energiepreise.

(2) Umweltverträglichkeit. Belastungen der natürlichen Mitwelt und damit auch der menschlichen Lebensbedingungen, wie sie mit der Nutzung fossiler Energieträger im Normalbetrieb und mit der Atomkernenergie besonders bei Unfällen verbunden sind, dürfen ein vertretbares Maß nicht überschreiten.

(3) Internationale Verträglichkeit, das heißt die internationalen Konflikte sollten durch energiepolitische Entwicklungen nicht verschärft, sondern möglichst gemildert werden. Verschärfend sind zum Beispiel einseitige Mineralölabhängigkeiten oder die Verbreitung von Atomwaffen im Gefolge von Atomkraftwerken und Wiederaufbereitungsanlagen.

(4) Sozialverträglichkeit, die Verträglichkeit mit der gesellschaftlichen Ordnung und Entwicklung (Meyer-Abich 1979 vgl. Nr. 10). Dieses Kriterium bedeutet, daß (a) die gesellschaftlichen Voraussetzungen für den bestimmungsgemäßen Betrieb technischer Anlagen (gesellschaftliche Sicherheit) und (b) die Folgen von Unfällen unter den herrschenden Zielen und Werten gesellschaftlich akzeptabel sein sollen.

Verglichen mit den vergleichsweise schlichten Kriterien Billigkeit und Versorgungssicherheit, die jetzt von der erweiterten Bedingung der Wirtschaftlichkeit umfaßt werden, sind Energiesysteme durch die vier Kriterien unversehens an die Spitze des Fortschritts in der Technikbewertung gerückt. Diesen Anspruch gilt es auch zur Bewertung der im Folgenden vorgestellten Möglichkeiten der Reduktion von CO<sub>2</sub>-Emissionen durch die Nutzung der Atomkernenergie zu wahren.

Derzeit sind in 25 Ländern der Erde 429 Atomkraftwerke mit einer Gesamtnettolenistung von 325 400 MW<sub>el</sub> in Betrieb. Zur Stromerzeugung tragen sie weltweit 17 Prozent (davon 88 Prozent Leichtwasserreaktoren = LWR), in der EG 35 Prozent (überwiegend LWR), in der Bundesrepublik Deutschland (ohne

ehemalige DDR) 33 Prozent (nur LWR) und in den USA 19 Prozent (praktisch nur LWR) bei. Die Betriebs Erfahrung mit LWRen liegt weltweit bei etwas mehr als 5000 Reaktorbetriebsjahren.

Die Uranvorräte der bisher genutzten Erzqualität könnten bei einer weiteren Nutzung im heutigen Umfang einige hundert Jahre ausreichen. Wenn auch Erze mit einem Urangehalt von nur noch etwa 1% – statt heute etwa 3% – genutzt werden könnten, würde der Zeitraum vermutlich auf einige tausend Jahre gestreckt.

### 5.3.1 Leichtwasserreaktoren (LWR)

Leichtwasserreaktoren werden als Zweikreisanlagen (Druckwasserreaktoren) oder als Einkreisanlagen (Siedewasserreaktoren) gebaut. Im ersten Fall wird der im Reaktorkern erzeugte Dampf durch einen Wärmetauscher, im zweiten Fall direkt zur Turbine geführt. Beide Reaktoren haben aufgrund physikalischer Gegebenheiten einen negativen Reaktivitätskoeffizienten, welcher beim Ausfall der Kühlung einem Leistungsanstieg entgegenwirkt und diesem auf einem erhöhten Temperaturniveau ein Ende setzt. Dies ist eine wichtige Sicherheitseigenschaft zur Verhinderung unkontrollierter Leistungsexkursionen. Gleichwohl kann es bei dem durch die Nachwärme unvermeidlichen Temperaturanstieg zu einer Kernschmelze kommen. Dies ist gefährlich, weil vor allem an den aus Zirkaloystahl bestehenden Hüllrohren Wasser katalytisch in Wasserstoff und Sauerstoff zersetzt wird, so daß bei einer Knallgasexplosion große Mengen an Radioaktivität aus der Kernschmelze in flüchtige Form (Gase, Aerosole) gebracht werden (Harrisburg-Unfall 1979) und beim Bersten des Sicherheitsbehälters (Containment) freigesetzt werden können. Der Sicherheitsbehälter ist auf dem neuesten Stand der Entwicklung, dem aber nur wenige Kraftwerke entsprechen, in gewissen Grenzen so ausgelegt, daß er weder durch äußere Einwirkungen wie Erdbeben oder Flugzeugabstürze noch durch Knallgasexplosionen im Innern zerstört wird. Neuerdings ist nach einem Reaktorunfall auch eine kontrollierte Druckentlastung des Sicherheitsbehälters möglich.

Leichtwasserreaktoren dienen der Erzeugung von Elektrizität. Der Wirkungsgrad der Umwandlung von Wärme in elektrische Energie beträgt hier etwa 32 Prozent. Bei den neuesten Anlagen ist außerdem vorgesehen, daß Wärme bis 500 Megawatt thermisch (MW<sub>th</sub>) (Blockgröße 1 300 MW<sub>el</sub>) ohne Änderungen an der Turbine ausgekoppelt werden kann. LWR-Wärme liegt im Temperaturbereich bis 300 °C.

Anders als zum Beispiel in der Chemietechnik war man sich hinsichtlich der Nutzung der Atomkernenergie des Entsorgungsproblems von Anfang an bewußt. Pro Druckwasser-Reaktor sind bei neueren Anlagen etwa 300 m<sup>3</sup> p.a. zu entsorgen. Dies ergibt etwa 1 350 200 l-Fässer mit schwachaktiven, ca. 90-100 200 l-Fässer mit mittelaktiven Abfällen und ca. 3 m<sup>3</sup> hochaktive (Wärme entwickelnde) Abfälle. Die radioaktiven Abfälle bleiben zunächst bis zu 10 Jahren im Kraftwerk, damit die Aktivität abklingt, und werden dann in zentrale Lager transportiert.

Trotz der frühzeitigen technologischen sowie der gesetzlichen Bemühungen, die Entsorgung atomkern-technischer Abfälle sicherzustellen, ist derzeit noch nicht absehbar, wann ein funktionsfähiges Endlager zur Verfügung stehen wird. Ein nationales Wiederaufarbeitungskonzept für die Bundesrepublik Deutschland (ohne ehemalige DDR) ist 1989 aufgegeben worden. Inzwischen haben die USA, Kanada, Schweden, Finnland und Spanien sich für die direkte Endlagerung radioaktiver Abfälle entschieden. In diesen Ländern befindet sich etwa 40 Prozent der heute in Betrieb befindlichen Atomkraftwerksleistung.

In der Bundesrepublik Deutschland (ohne ehemalige DDR) soll die Endlagerung der konditionierten radioaktiven Abfälle in tiefen geologischen Formationen durchgeführt werden. Das Endlager wird dabei ähnlich einem Bergwerk angelegt, das heißt die in einer Tiefe von einigen 100 m liegende für die Endlagerung vorgesehene Formation wird durch Schächte und ein System von Strecken erschlossen, durch die die radioaktiven Abfälle bis zu den vorgesehenen Einlagerungsstellen transportiert werden. Die Einlagerung der wärmeentwickelnden Abfälle erfolgt in Bohrlöchern, die von den Strecken in das darunter liegende Gestein gebohrt werden, oder, wenn die wärmeentwickelnden Abfälle in schweren Behältern verpackt sind, in Strecken. Nicht wärmeentwickelnde Abfälle werden in Strecken beziehungsweise größeren Kammern gelagert. Nach der Befüllung der Lagerbohrlöcher und Lagerstrecken werden sie versiegelt. Anschließend werden auch die Zufahrtsstrecken mit Versatzmaterial und Abschlußbauwerken verfüllt und verschlossen, so daß der ursprüngliche Zustand der geologischen Formation wieder hergestellt wird. Abschließend werden die Schächte verfüllt und mit Schachtopfen versehen. Die Radioaktivität des deponierten Materials klingt je nach Packungsdichte innerhalb mehrerer hundert Jahre auf die Aktivität natürlicher Uranlagerstätten ab, erreicht allerdings erst nach erheblich längerer Zeit die Aktivität der Umgebung. Freisetzungen von Radioaktivität sind dadurch denkbar, daß Grundwasser in die darunter liegenden Deponien eindringt, die (schwerlöslichen) Stoffe allmählich löst und diese zum Beispiel über Kapillarwirkungen sowie Ionenaustauschprozesse nach langer Zeit in geringem Umfang an die Oberfläche gelangen. Rechnerisch würde das Maximum der an die Oberfläche gelangenden Aktivität in Höhe von 4 Mikro-Sievert (Sv) Jod nach ca. 100 000 Jahren und 0,1 Milli-Sievert (mSv) Uran nach etwa 100 Millionen Jahren erreicht. Diese Abschätzung steht im Einklang mit Messungen der sehr geringen Ausbreitung radioaktiver Zerfallsprodukte in den Uranerzlagerstätten von Gabun (Oklo), wo vor etwa 2 Milliarden Jahren – als im Uran das Isotop U 235 noch mit etwa 3 Prozent enthalten war – über einen Zeitraum von 200 Tausend Jahren Atomkernspaltungsprozesse naturgeschichtlich stattgefunden haben.

Geplant ist, die radioaktiven Abfälle letztlich im Salzstock Gorleben zu lagern, soweit eine starke Wärmeentwicklung erfolgt, und andernfalls in der Schachanlage Konrad bei Salzgitter. Die Erkundung des Salzstocks wird bis Mitte der 90er Jahre dauern. Zumindest bis dahin bleibt unklar, was mit dem Atom-müll letztlich geschehen soll.

## Wirtschaftlichkeit

Die Kosten der Stromerzeugung durch LWRen bestehen aus den Anlagekosten, den Brennstoff- und Entsorgungskosten (einschließlich derer des Kraftwerks selbst) und den Betriebskosten (einschließlich der Wartungskosten). Hinzu kommen gegebenenfalls die sonstigen gesellschaftlichen Kosten (externe Kosten).

Anlagekosten: Die spezifischen Kosten der neuesten Atomkraftwerke (Konvoi-Anlagen Isar 2, Emsland, Neckarwestheim 2) betragen 3 340 +/- 160 DM/kWe. (Preisbasis 1987, ohne Erstkern, Bauzinsen und Steuern). Diese Kosten sind wesentlich niedriger als in den USA, etwa 40 Prozent höher als in Frankreich und etwa so hoch wie in Japan. Die künftige Entwicklung ist offen. Durch sicherheitstechnische Fortschritte gab es in der Bundesrepublik Deutschland einen beträchtlichen Kostenanstieg seit Mitte der 70er Jahre. Sollte es zum Bau größerer Serien kommen, könnten sich Rationalisierungsvorteile um 10 Prozent oder mehr ergeben. Eine Standardisierung kann allerdings auch kostensteigernd wirken, wenn gemeinsame Schwachstellen gefunden werden. In jedem Fall ist außerdem mit Kosten für die Nachrüstung zu rechnen, um ältere Anlagen nach dem Atomgesetz dem jeweiligen Stand der Erkenntnis anzupassen. Zum Beispiel haben die Nachrüstungsmaßnahmen für die Kraftwerke Würgassen, Brunsbüttel, Stade und Unterweser bisher ca. 2 Milliarden DM gekostet.

Der Beitrag der Anlagekosten zur Stromerzeugung hängt von der betriebswirtschaftlichen Abschreibungszeit und von der Lebensdauer des Kraftwerks ab. Die erstere beträgt 19 Jahre, die letztere kann bei 30 Jahren liegen. Zuverlässige Erwartungswerte liegen nach den bisherigen Erfahrungen noch nicht vor.

Brennstoff- und Entsorgungskosten: Die derzeitigen Preise liegen bei US\$ 30/kg U308 und DM 550/kg Uran. Langfristig ist beim Natururan mit einem realen Preisanstieg zu rechnen. Die Wiederaufarbeitung abgebrannter Brennelemente kostet mit Endlagerung ca. 2 000-2 500 DM/kg Spaltmaterial (SM). Die der direkten Endlagerung werden auf 900-1 220 DM/kg SM geschätzt. Die Kosten für den Abriß eines großen LWR-Kraftwerks sind nicht bekannt, weil es hierzu in Europa bisher keinerlei und in USA nur geringe Erfahrungen gibt. Atomkerntechniker meinen, daß die Entsorgungskosten mit insgesamt DM 4 000 /kg SM nicht zu gering angesetzt seien. Auf dieser Basis ergäben sich die Brennstoff- und Entsorgungskosten für einen großen LWR zu 2,6 DPfg /kWh. Solange die Entsorgung atomkerntechnischer Anlagen noch nicht gelöst ist, können derartige Beträge jedoch allenfalls Anhaltspunkte geben.

Gesellschaftliche Kosten: Unklar ist außerdem die wirtschaftliche Bewertung der mit der Atomkernenergie verbundenen Risiken im Bereich kleiner Wahrscheinlichkeiten und großer Schadensausmaße. Schäden oberhalb von 500 Millionen DM werden nicht versichert, aber schon der Unfall im Kraftwerk Three Mile Island (1979) hat gezeigt, daß sich in diesem Bereich Aktiva in Milliardenhöhe innerhalb einer Viertelstunde in Passiva gleicher Größenordnung verwan-

deln können. Im Fall des Reaktorunfalls von Tschernobyl liegen die betrieblichen und insgesamt gesellschaftlichen Kosten noch wesentlich höher.

Welche Kosten mit dem Betrieb von Atomkraftwerken in Zukunft verbunden gewesen sein werden, ist sowohl hinsichtlich der Entsorgungskosten als auch hinsichtlich der gesellschaftlichen Kosten heute nicht bekannt. Beschränkt man sich auf die in der Vergangenheit bereits angefallenen, die in der Gegenwart anfallenden und die für die Zukunft bereits absehbaren Kosten, so ergeben sich für den Grundlastbetrieb Vorteile gegenüber der heimischen Steinkohle und etwa ein Gleichstand gegenüber der Braunkohleverstromung. Ein noch günstigeres Bild ergäbe sich, wenn die Arbeitsverfügbarkeit der Atomkraftwerke noch um ca. 10 Prozent erhöht werden könnte. Diese Möglichkeit ist umstritten. Zum Mittellastbetrieb hin nimmt der Kostenvorteil der Atomenergie gegenüber der Steinkohle ab.

Da Atomkraftwerke in der Bundesrepublik Deutschland (ohne ehemalige DDR) wegen der mit ihrem Betrieb verbundenen Risiken nicht in Ballungsräumen oder in ihrer unmittelbaren Nähe gebaut werden dürfen, konnten bisher so gut wie keine Erfahrungen mit der Auskopplung von Fernwärme gemacht werden.

Die der Kommission vorliegenden Untersuchungen zur Wirtschaftlichkeit der Atomenergienutzung gehen leider nicht über die betriebswirtschaftlich interessanten Daten hinaus, soweit sie derzeit bekannt sind. Eine volkswirtschaftliche und technologiepolitische Bewertung, welche wirtschaftlichen Perspektiven sich damit verbinden würden, liegt leider nicht vor.

### Umweltverträglichkeit

Die Nutzung der Atomenergie hat gegenüber der Verbrennung fossiler Energieträger den Vorteil, daß zahlreiche Schadstoffemissionen nicht vorkommen. Ein eindeutiger Vorteil in Bezug auf die absehbare Klimaänderung ist außerdem, daß kein CO<sub>2</sub> emittiert wird. Im bestimmungsgemäßen Betrieb ist die Nutzung der Atomenergie, obwohl es auch hier problematische Emissionen gibt, entschieden umweltverträglicher als die Verbrennung fossiler Energieträger. Dies gilt nicht mehr, wenn es zu großen Unfällen kommt.

Welche Unfallrisiken beim jetzigen Stand mit der Nutzung der Atomenergie verbunden sind, ist den „Deutsche(n) Risikostudie(n) Kernkraftwerke“, Phase A (1979) und Phase B (1989), zu entnehmen. Zu unterscheiden sind Störfälle und Unfälle. Störfälle sind Ereignisse, deretwegen zwar der Betrieb der Anlage unterbrochen werden muß, außerhalb des Kraftwerks jedoch keine zulässigen Grenzwerte überschritten werden. Unfälle hingegen überschreiten die sicherheitstechnische Auslegung des Kraftwerks, so daß außerhalb der Anlage die zulässigen Grenzwerte überschritten werden können. Dabei brauchen nicht alle Sicherheitsbarrieren vollständig zu versagen.

Risiken heißen diejenigen Gefahren, die durch eine individuelle oder öffentliche Entscheidung eingegan-

gen oder vermieden werden können. Daß Erdbeben stattfinden, ist in bestimmten Regionen eine Gefahr; ein Risiko hingegen gehen diejenigen ein, die ihren Wohnsitz in ein erdbebengefährdetes Gebiet verlegen. Risiken werden in der Regel nicht um ihrer selbst willen eingegangen, sondern lediglich in Kauf genommen, um Ziele zu erreichen, auf die man sonst verzichten müßte. Das gilt auch für die Risiken der Atomkernenergienutzung. Die immanente Gefährlichkeit dieser Energietechnik hat dazu geführt, daß der Entwicklung der Sicherheitstechnik hier eine Pionierrolle zugefallen ist. Berücksichtigt man die sicherheitstechnischen Bemühungen im Risikobegriff, so sind Risiken als diejenigen Gefahren zu verstehen, die

1. durch eine individuelle oder öffentliche Entscheidung eingegangen oder vermieden werden können;
2. trotz der getroffenen sicherheitstechnischen Vorkehrungen noch bestehen.

In der politischen Diskussion wird die in dieser Weise trotz des sicherheitstechnischen Aufwands verbleibende und insoweit restliche Gefahr gelegentlich als Restrisiko bezeichnet. Der Zusatz hat jedoch nur eine rhetorische Bedeutung, denn jedes Risiko ist relativ zu den getroffenen Sicherheitsmaßnahmen ein Restrisiko, so daß die Restlichkeit nicht besonders betont zu werden verdient.

Die derzeit in der LWR-Technik angewandte Sicherheitsphilosophie beruht auf dem Konzept der Vorsorge gegen bestimmte Auslegungstörfälle und auf einem zu diesem Zweck entwickelten deterministischen Prinzip gestaffelter Sicherheitsbarrieren. Die Integrität der Barrieren kann nicht ohne eine Reihe von aktiven Sicherheitssystemen gewährleistet werden, die nach bestimmten Auslegungsprinzipien wie Redundanz, Diversität, räumliche Trennung, Schutz gegen äußere Einwirkungen konzipiert werden sollen. Die Gesamtheit der Sicherheitsmaßnahmen wird in Anlehnung an das in den USA formulierte „defense-in-depth“-Konzept drei verschiedenen Sicherheitsebenen (Qualitätsgewährleistung; Verhinderung von Störfällen; Begrenzung von Störfällen) zugeordnet. Die Verwundbarkeit der nach der derzeitigen Sicherheitsphilosophie konzipierten Systeme liegt in der Tatsache begründet, daß zwar für die Auslegungstörfälle die Schäden außerhalb der Anlage auf ein festgelegtes Maß begrenzt bleiben, daß aber jenseits des Bereichs der Auslegung Unfälle mit extrem hohen Schäden möglich sind und diese Schäden in räumlicher und in zeitlicher Dimension eine erhebliche Reichweite haben können. Neuerdings soll dem so genannten defense-in-depth-Konzept nachträglich eine vierte Ebene, mehr administrativer als technischer Art, zur Verhinderung beziehungsweise Begrenzung von Unfällen hinzugefügt werden.

Die „Deutsche Risikostudie Kernkraftwerke“ der Phase A (1979) hat für die Referenzanlage, den Druckwasserreaktor Biblis B, eine Wahrscheinlichkeit der sicherheitstechnisch nicht beherrschten Stör- beziehungsweise Unfälle von 10<sup>-4</sup> pro Reaktorbetriebsjahr festgestellt. In 2 Prozent dieser Unfälle sollte Radioaktivität durch ein frühes Containment-Versagen massiv freigesetzt werden, in den meisten Fällen erst im Verlauf eines Tags und in geringerem Umfang. Das maxi-

male Schadensausmaß ergab sich zu ca. 15 000 baldigen und ca. 100 000 späteren Todesfällen. Als der Unfall in Tschernobyl passierte, waren diese Risikoberechnungen im Prinzip längst bekannt. Sowohl die in der Öffentlichkeit eingetretene Überraschung als auch die politischen Verlautbarungen, Unfälle dieses Ausmaßes seien hierzulande unmöglich, deuten insoweit auf eine bemerkenswerte Unkenntnis der risikanalytischen Ergebnisse der (offiziellen) Gesellschaft für Reaktorsicherheit (GRS) hin. Die erwähnte Studie bezog sich, wie gesagt, auf ein deutsches Kraftwerk.

Die in Tschernobyl installierten Kraftwerke sind vom Reaktortyp und ihren Unfallrisiken von den hiesigen unterschieden, diesen bezüglich des Uraninventars und damit der maximal möglichen Freisetzung von Radioaktivität im Schadensfall jedoch sehr ähnlich.

Die Gesellschaft für Reaktorsicherheit hat die Wahrscheinlichkeit der durch die Sicherheitssysteme nicht beherrschten Stör- beziehungsweise Unfälle in der Phase B (1989) von  $10^{-4}$  auf  $3 \cdot 10^{-5}$  pro Reaktorbetriebsjahr zurückgenommen, also etwa auf ein Drittel reduziert. Die Unfallverläufe werden jetzt allerdings so eingeschätzt, daß mit frühen und massiven Freisetzungen von Radioaktivität wesentlich häufiger zu rechnen ist, als nach Phase A anzunehmen war. Die Unfallfolgen wurden in der Phase B nicht erneut berechnet, auch nicht das maximale Schadensausmaß. Insgesamt haben sich eher Verschärfungen gegenüber den Ergebnissen der Phase A ergeben. Zugenommen hat auch die Unsicherheit, wieweit man sich bereits ein genaues Bild von der Sicherheit der Atomkerntechnik machen kann: „Die Untersuchungen zu Kernschmelzunfällen sind noch mit großen Unsicherheiten behaftet. . . . Grundsätzlich sind immer Unfallabläufe denkbar, die mit sehr hohen Freisetzungen verbunden sind“ (GRS, Dt. Risikostudie Kernkraftwerke, Phase B, Zusammenfassung, Juni 1989, S. 83).

Die beim derzeitigen Stand der Reaktortechnik bestehende Gefahr eines Unfalls mit einem intolerablen Schadensausmaß darf allenfalls übergangsweise in Kauf genommen werden. Für Siedewasserreaktoren gibt es bisher keine entsprechende Risikostudie. Wesentliche Abweichungen von der Biblis-Studie sind aber wohl nicht zu erwarten.

Im übrigen sind auch mit dem Normalbetrieb atomkerntechnischer Anlagen Umweltbelastungen verbunden.

– Beim Abbau und der Aufbereitung von Uran resultiert die hauptsächliche radiologische Belastung für die Beschäftigten wie auch für die in der näheren Umgebung lebende Bevölkerung aus den Emissionen insbesondere von Radon, aber auch von Staubteilchen, die Uran und seine Zerfallsprodukte enthalten. Radon, ein radioaktives Edelgas und Zerfallsprodukt des Urans, ist in der kristallinen Struktur des Gesteins eingeschlossen und wird beim Aufschließen des Gesteins in die Atmosphäre freigesetzt. Die Lagerhalden von Urankonzentrat, vor allem die Abfallhalden, sind eine Langzeitexpositionsquelle für die Umgebung über die Betriebsphase hinaus.

– Im Normalbetrieb der Kraftwerke betragen die radioaktiven Emissionen in der Abluft etwa 1 Prozent

der genehmigten Werte. Dies gilt auch für die Ableitung von Radioaktivität im Abwasser, ausgenommen Tritium, wo 1988 durchschnittlich 10 Prozent und maximal etwa die Hälfte des zulässigen Werts erreicht wurden. Die novellierte Strahlenschutzverordnung schreibt für die beruflich strahlenexponierten Personen vor, über den Jahresgrenzwert von 50 mSv hinaus die Lebenszeitdosis auf 400 mSv zu begrenzen. In Großbritannien ist die beruflich zulässige Jahresdosis auf 15 mSv herabgesetzt worden.

– Die mit der Entsorgung von Atomkernkraftwerken verbundenen Risiken sind bisher im wesentlichen nicht untersucht und sind auch nur soweit zu ermitteln, wie es bereits Vorstellungen der technischen Abläufe gibt;

– Denkbar sind luftelektrische Veränderungen durch die Anreicherung von Kr85 in der Atmosphäre. Ihr Beitrag zur Luftionisation ist derzeit jedoch kleiner als 1 Prozent. Alle diese Belastungen sind von geringem Gewicht als die zuvor geschilderten Unfallrisiken.

### Internationale Verträglichkeit

Daß Energiesysteme die internationalen Konflikte verstärken können, haben in den letzten Jahrzehnten zuerst die Energiepreiskrise (seit 1973) und jüngst die Krise in der Golfregion deutlich werden lassen. Zunehmende Aufmerksamkeit hat dann auch die Frage gefunden, wieweit die – 1953 mit dem amerikanischen Programm „Atoms for Peace“ intendierte – Trennung ziviler und militärischer Nutzungen der Atomkernenergie in der Praxis aufrechtzuerhalten sei. Zahlreiche Studien haben zu dem Ergebnis geführt, daß dies nicht der Fall ist, so daß die Verbreitung von Atomkernkraftwerken, vor allem in Verbindung mit Wiederaufarbeitungsanlagen im Brennstoffkreislauf, zur Verbreitung von Atomwaffen beitragen kann. Insbesondere hat sich die Hoffnung nicht bestätigt, daß die Isotopenmischung des im zivilen Reaktor entstehenden Plutoniums nicht waffentechnisch nutzbar sei. Auch die Kontrollen der IAEA können Plutonium-Diversionen nicht verhindern, sondern bestenfalls dazu beitragen, daß sie bekannt werden; aus Gründen der Meßgenauigkeit ist aber nicht einmal damit zuverlässig zu rechnen. Da die Proliferationsgefahr nach dem Stand des Wissens grundsätzlich zu bejahen ist, so daß die Größe dieser Gefahr nur noch von politischen Motivationen einzelner Länder abhängt, hat die Kommission hierzu keine weiteren Studien in Auftrag gegeben.

### Sozialverträglichkeit

Technische Innovationen verändern die Möglichkeit des Austrags der jeweils bestehenden internationalen, gesellschaftlichen und persönlichen Konflikte so, wie wenn während eines Spiels unversehens neue Züge erlaubt werden. Dies wird im allgemeinen dazu führen, daß die gesellschaftliche Ordnung den neuen Gegebenheiten angepaßt und die Entwicklung anders verlaufen wird, als es sonst der Fall gewesen wäre. Die Veränderungen der gesellschaftlichen Ord-

nung und Entwicklung von der vorangegangenen Situation her zu bewerten, ist die Aufgabe der Sozialverträglichkeitsanalyse. Sozialverträglichkeit bedeutet Verträglichkeit mit der gesellschaftlichen Ordnung und Entwicklung. Dabei geht es sowohl um die gesellschaftlichen Voraussetzungen für die Einführung bestimmter Innovationen als auch um die späteren Folgen.

Das von der Enquete-Kommission „Zukünftige Kernenergiepolitik“ des Deutschen Bundestags in das politische Entscheidungsfeld eingeführte Kriterium der Sozialverträglichkeit hat sich durch eine umfangreiche Pilotstudie (vgl. Meyer-Abich 1986, Nr. 10) als geeignet erwiesen, um verschiedene Energiesysteme in dieser Hinsicht vergleichend zu beurteilen. Im Rahmen der Untersuchung sind projektbegleitend Methoden entwickelt worden, derer sich auch künftige Sozialverträglichkeitsanalysen bedienen können. Die Ergebnisse des Forschungsprojekts rechtfertigen die Empfehlung, in Zukunft andere als energietechnische Innovationen ebenfalls auf ihre Sozialverträglichkeit hin zu bewerten, bevor sie eingeführt werden. Diese Bewertung stellt allerdings auch die Verwaltung und die politischen Akteure vor Anforderungen, denen sie nicht ohne weiteres gewachsen sind. Insbesondere kommt es darauf an, daß dem politischen Diskurs über die wissenschaftlichen Ergebnisse von Sozialverträglichkeitsanalysen im Entscheidungsprozeß hinreichend Raum gegeben wird. Es ist eine Frage der politischen Kultur, wie die Politik mit dem Wissen umgeht.

Das Kriterium der Sozialverträglichkeit hat mit vielen anderen politischen Entscheidungsdimensionen gemein, daß es sich nicht umfassend quantifizieren läßt. Qualitative Antworten auf die richtigen Fragen sind auch hier nützlicher als Zahlenangaben zu irreführenden oder uninteressanten Fragen. Die Aussageform der Sozialverträglichkeitsanalyse ist der Implikationskatalog, d. h.: es zeigt sich, wieweit die Entscheidung für dieses oder jenes technische System mit exogen vorgegebenen Zielen oder Werten der gesellschaftlichen Ordnung und Entwicklung verträglich beziehungsweise konsistent ist.

Festgestellt wird also die relative Akzeptabilität der fraglichen Innovationen relativ zu Zielen oder Werten – die sich wandeln können –, nicht ihre Akzeptanz im empirischen Meinungsfeld. Die Aussageform des Implikationskatalogs gewährleistet, daß hier nicht Wissenschaftler der Allgemeinheit vorzuschreiben versuchen, was für sie akzeptabel sei. Um die Akzeptabilität von Innovationen geht es auch in der öffentlichen Diskussion, wohingegen die Akzeptanzforschung sich an dieser Diskussion selbst nicht beteiligt.

Das methodische Instrument, um eine technische Innovation auf ihre Verträglichkeit mit der gesellschaftlichen Ordnung und Entwicklung zu beurteilen, ist die soziale Konstruktion. Dasselbe System, das zunächst in technisch-wirtschaftlichen Begriffen bestimmt war, wird durch die soziale Konstruktion zum Beispiel als ein Rechtsstatbestand beschrieben, so daß es nach juristischen Kategorien zu beurteilen ist. Die soziale Konstruktion erfolgt in der genannten Studie verglei-

chend für zwei verschiedene energiepolitische Entwicklungen: den Ersatz fossiler Energieträger durch Atomkernenergie (Fall K) und durch Sonnenenergie (Fall S).

Analog zur technischen Risikoanalytik sind unter den sozialen Risiken eines Energiesystems diejenigen Gefahren zu verstehen, die trotz der getroffenen Sicherungsmaßnahmen gegen nichttechnische Gefahren noch bestehen. Maßnahmen sind erforderlich gegen den Plutoniumraub von außen, gegen die Freisetzung von Radioaktivität, gegen den Plutoniumraub durch Insider und gegen Sabotage. Um diesen Gefahren zu begegnen, bedarf es, wie die Untersuchung zeigt, sowohl anlagenbezogener als auch gesellschaftsbezogener Maßnahmen. Rein technische Sicherungen erweisen sich in beiderlei Hinsicht als nicht ausreichend. Die Sicherungslinie muß stufenweise auch in das gesellschaftliche Umfeld vorverlegt werden und reicht dadurch über den Kreis der Beschäftigten hinaus in die Gesellschaft hinein.

Eine besondere Gefahr liegt in der Kumulation von Sicherungen aufgrund von Überreaktionen der Öffentlichkeit. Es ist denkbar, daß der Austrag innenpolitischer Konflikte durch die Einführung des Energiesystems K ebenso nachhaltig verändert würde wie der der internationalen Konflikte durch die Atombombe. Nachdem die Atomkernenergie bereits zu einer maßgeblichen Determinanten der internationalen Auseinandersetzung geworden ist, erweist sie sich auch hinsichtlich der inneren Ordnung als entsprechend problematisch.

Die Studie ergibt jedoch, daß LWRen hinsichtlich ihrer Sozialverträglichkeit grundsätzlich anders zu beurteilen sind als Brüter, wenn keine Wiederaufarbeitung erfolgt. Die Thesen (4) und (7) im zusammenfassenden Fazit der Studie besagen:

„(4) Sonnenenergie und die Energiequelle Energieeinsparung sind hinsichtlich der Verfassungsziele eindeutig sozialverträglicher als Atomkernenergie. Ein auf dem Plutoniumkreislauf (Wiederaufarbeitungsanlagen, Brutreaktoren) beruhendes Atomenergiesystem wäre unter den heutigen Verfassungszielen nicht sozialverträglich. Die innere Ordnung würde durch das Energiesystem K nachhaltig gefährdet, nachdem die internationale Ordnung es durch die Atomwaffen schon ist.“

„(7) Soweit sich die direkte Endlagerung abgebrannter Brennstäbe als praktikabel erweist und Leichtwasserreaktoren wirtschaftlich sinnvoll sind, ist aus *Gründen der Sozialverträglichkeit* nichts dagegen einzuwenden, auch im Fall S diese Reaktoren neben der Sonnenenergienutzung, der Energieeinsparung und der Nutzung fossiler Energieträger übergangsweise weiter zu betreiben.“

Über die Zerstörung der physischen Lebensbedingungen in Räumen der Größenordnung 1 000 km<sup>2</sup> hinaus wäre insbesondere ein großer atomkerntechnischer Unfall, wie er nach den Ergebnissen der „Deutsche(n) Risikostudie(n) Kernkraftwerke“ der GRS aus hierzulande – mit geringer Wahrscheinlichkeit – möglich wäre, von enormer gesellschaftlicher Bedeutung für die Zukunft unseres Landes.

### Beiträge der Nutzung von Leichtwasserreaktoren zur Verminderung der CO<sub>2</sub>-Emissionen

Wieweit es sich empfiehlt, zur Verminderung der CO<sub>2</sub>-Emissionen Leichtwasserreaktoren hinzuzubauen oder die bestehenden länger zu betreiben, als es andernfalls geschehen würde, ist eine Frage des Nutzens, der mit dem vorstehend geschilderten wirtschaftlichen und sonstigen Aufwand zu erzielen wäre.

Elektrizität: Die CO<sub>2</sub>-Emissionen aus der Verstromung fossiler Energieträger betragen bei den derzeit besten Wirkungsgraden (38 Prozent) (vgl. Tab. 15).

Tabelle 15

### CO<sub>2</sub>-Emissionen aus der Verstromung fossiler Energieträger bei den derzeit besten Wirkungsgraden

Steinkohle .....	0,87 Mio. t CO <sub>2</sub> /TWh <sub>e</sub>
Braunkohle .....	1,05 Mio. t CO <sub>2</sub> /TWh <sub>e</sub>
Mineralöl .....	0,76 Mio. t CO <sub>2</sub> /TWh <sub>e</sub>
Erdgas .....	0,50 Mio. t CO <sub>2</sub> /TWh <sub>e</sub>

Die Gesamtemissionen an CO<sub>2</sub> des derzeitigen Kraftwerkparcs (verschiedene Wirkungsgrade) betragen 1987 beziehungsweise würden mindestens betragen (vgl. Tab. 16):

Tabelle 16

### Gesamtemissionen an CO<sub>2</sub> des derzeitigen Kraftwerkparcs (verschiedene Wirkungsgrade)

	Wirkungsgrad Stromerzeugung		34% CO <sub>2</sub> heute	38% CO <sub>2</sub> mindestens
Steinkohle .....	13,5	135,8	132	118
Braunkohle .....	33,9	77,8	92	82
Mineralöl .....	15,7	12,4	10,5	9,4
Erdgas .....	10,2	28,7	16,1	14,4
	GW <sub>el</sub>	TWh <sub>el</sub>	Mio. t	Mio. t

Tabelle 17

### CO<sub>2</sub>-Minderemissionen und Kraftwerkspektrum für den Referenzfall 2005

	SK ersetzt	BK ersetzt
(a) .....	50 Mio. t	60 Mio. t
(b) .....	100 Mio. t	120 Mio. t

Referenzfall in den vier Fällen (jeweils GW<sub>el</sub>):

	(a) SK	(a) BK	(b) SK	(b) BK
Steinkohle .....	3,9	13,5	—	13,5
Braunkohle .....	33,9	24,3	28,2	14,7
Mineralöl .....	15,7	15,7	15,7	15,7
Erdgas .....	10,2	10,2	10,2	10,2

Würden ab sofort LWR-Kraftwerke neu geplant und zur Vermeidung der Klimaänderung akzeptiert, so könnten die ersten allerfrühestens 1997 in Betrieb gehen. Je nachdem, ob dann pro Jahr (a) ein oder (b) zwei Kraftwerke hinzukommen und ob dafür Stein- oder Braunkohlekraftwerke (SK oder BK) nicht gebaut beziehungsweise dadurch ersetzt würden, ergäben sich für den Referenzfall 2005 (bei 6 000 Betriebsstunden pro Jahr) folgende CO<sub>2</sub>-Minderemissionen (vgl. Tab. 17).

### Fernwärme

Die Fernwärmeauskopplung aus LWR-Kraftwerken ist – inzwischen auch über längere Strecken – im Prinzip möglich, kann aber kurzfristig allenfalls einen sehr kleinen Beitrag zur CO<sub>2</sub>-Emissionsminderung leisten.

### Wasserstoffgewinnung

Elektrizität aus LWR-Kraftwerken in Gestalt des Sekundärenergieträgers Wasserstoff zu speichern, eröffnet im Prinzip eine Nutzungsmöglichkeit der Atomkernenergie außerhalb des Elektrizitätsbereichs, kann aber auf absehbare Zeit kein wirtschaftliches Potential erschließen.



## Veredelung fossiler Energieträger

CO<sub>2</sub>-Emissionsminderungen durch flüssige oder gasförmige Energieträger, die durch Atomkernenergie aus fossilen Energieträgern gewonnen werden, wären nur möglich, wenn das bei der Umwandlung entstehende CO<sub>2</sub> deponiert werden könnte. Dies ist nicht der Fall.

### Bewertung der Möglichkeiten zur CO<sub>2</sub>-Emissionsminderung durch Leichtwasserreaktoren

So wünschenswert die Minderung der CO<sub>2</sub>-Emissionen aus der Verbrennung fossiler Energieträger ist, zeigt die Bewertung der derzeitigen LWR-Technik nach dem Bewertungsraster der Energie-Enquete des Deutschen Bundestags (1980) doch, daß

- der monetäre Preis zwar akzeptabel ist, soweit er sich bisher übersehen läßt, künftige Zusatzbelastungen aber nicht auszuschließen sind;
- die beim derzeitigen Stand der Reaktortechnik bestehende Gefahr eines Unfalls mit einem intolerablen Schadensausmaß allenfalls übergangsweise in Kauf genommen werden darf;
- ungelöste Probleme der internationalen Verträglichkeit bestehen;
- Die Sozialverträglichkeit der LWR-Technik zwar bei weitem nicht so schlecht ist wie die des Brütlers, jedoch auch nicht unproblematisch ist.

Zu bedenken bleibt andererseits, daß die Risiken der Klimaveränderung vor allem den Ländern der Dritten Welt aufgebürdet werden, so daß wir diesen Ländern durch unsere CO<sub>2</sub>-Emissionen schaden. Auf Kosten dieser Länder im Wohlstand zu leben, ist nicht zu rechtfertigen. Uns durch den Ausstieg aus der Atomkernenergienutzung einer national eingegangenen Gefahr zu entziehen, indem wir – soweit damit erhöhte oder in geringerem Umfang verminderte CO<sub>2</sub>-Emissionen verbunden wären – andere Länder einer anderen Gefahr aussetzen, wäre ebenfalls nicht akzeptabel. Unter diesen Umständen wird die Frage dringlich, welche Möglichkeiten denkbar sind, um die Gefahren der LWR-Technik zu vermindern. Solange andere Länder Atomkernenergie nutzen, liegt es allemal auch in unserem Interesse, daß dies ausreichend sicher geschieht.

Wesentliche Entwicklungsziele, deren Realisierung die vorangegangene Bewertung verändern würde, sind:

- 1) Die Verminderung des maximal möglichen Schadensausmaßes. Katastrophale Unfälle dürfen auch mit noch so geringer Wahrscheinlichkeit nicht riskiert werden.
- 2) Passive Sicherheit atomtechnischer Anlagen, damit der Schaden für die Umgebung nicht davon abhängt, ob sicherheitstechnische Einrichtungen versagen, sondern der Reaktor bei Störfällen naturgesetzlich, das heißt von sich aus und ohne Schaden für die Umgebung, wieder zur Ruhe kommt. Aktive und passive Sicherungen unterscheiden

sich wie eine Bahnschranke und eine Unterführung bei einer Straße-Schiene-Kreuzung.

- 3) Entlastung künftiger Generationen von den Altlasten atomkerntechnischer Anlagen, die von uns in Betrieb genommen worden sind, ohne eine klare Vorstellung davon zu haben, wie der radioaktive Müll entsorgt werden kann.

Fortschritte in diesen Hinsichten sind nicht ausgeschlossen. Zum Beispiel ist bereits ein kernschmelzfestes Containment vorgeschlagen worden, das den Belastungen bei Kernschmelzen unter vollem Systemdruck einer Dampfexplosion, einer H<sub>2</sub>-Detonation und der Schmelze-Beton-Reaktion standhalten soll.

Für die Weiterentwicklung der LWR-Technik werden außerdem bereits diskutiert

- eine Reduktion der Strahlenbelastung des Betriebspersonals (bessere Zugänglichkeit und Instandhaltungsfreundlichkeit, verbesserte Abschirmungen, weniger kobalthaltige Stähle);
- die zusätzliche Installation eines passiven sekundärseitigen Nachwärmeabfuhrsystems;
- die Einführung einer speicherprogrammierbaren digitalen Leit- beziehungsweise Sicherheitsleit-technik;
- Auslegungsveränderungen, um die Zeitspanne für das Einleiten anlageninterner Notfallschutzmaßnahmen und ihre Wirksamkeit auch beim Ausfall der gesamten Stromversorgung zu erhöhen;
- Auslegungsvorkehrungen, welche die Kühlbarkeit der Schmelze gewährleisten und ein Durchdringen des Gebäudefundaments verhindern.

Neu und eine Modifikation der bisherigen Sicherheitsphilosophie, Menschen soweit wie möglich aus dem Stör- beziehungsweise Unfallmanagement herauszuhalten, sind außerdem präventive anlageninterne Notfallschutzmaßnahmen zur Erhaltung der Integrität des Sicherheitsbehälters, ein Unfallbekämpfungs-Management also.

Im übrigen gibt es Konzepte von verkleinerten wassergekühlten Reaktoren, zum Beispiel den amerikanischen AP-600, den SBWR und eine Weiterentwicklung des Advanced Candu-Reaktors. Neu sind auch Pläne für LWR-Heizreaktoren bis 50 MWth und für verschiedene Varianten des PIUS-Reaktors.

Wie sich die LWR-Kosten entwickeln, wenn für die Sicherheits- und Entsorgungsfragen befriedigende Lösungen gefunden werden, ist eine offene Frage. Den oben angegebenen Kostendaten ist insoweit nur ein indikatorischer Wert beizumessen.

### 5.3.2 Hochtemperaturreaktoren (HTR)

Hochtemperaturreaktoren sind gasgekühlt (durch Helium). Die Leistungsdichte im Kern ist relativ gering, das heißt der Reaktorkern ist relativ groß und hat eine große Wärmekapazität. Dies trägt wesentlich zu den Sicherheitseigenschaften des HTR bei. Der HTR hat wie der LWR einen negativen Temperaturkoeffizienten, das heißt bei einem Anstieg der Temperatur

über die Betriebstemperatur hinaus wird der Reaktor auf erhöhtem Temperaturniveau von alleine unterkritisch und schaltet sich ab. Dies ist beim HTR ein entscheidendes Element passiver Sicherheit, weil hier nicht die Gefahr einer Kernschmelze und einer Knallgasexplosion besteht.

Hochtemperaturreaktoren sind bisher nur als Demonstrationsanlagen betrieben worden. Der Jülicher Atomversuchsreaktor (AVR) (50 MWth) hat sich über viele Jahre zur Lieferung von Prozeßwärme (950 °C) sehr bewährt. Der THTR 300 in Schmehausen wurde 1986 in Betrieb genommen und 1989 wieder stillgelegt.

In der Entwicklung sind HT-Modulreaktoren. Der HTR-Modul mit einem Druckbehälter aus Stahl und einer thermischen Leistung von 200 bis 300 MWth hat eine sehr niedrige Leistungsdichte (3 MWth/m<sup>3</sup>) und eine längliche Bauart. Damit wird eine passive Abführung der Nachzerfallwärme möglich, mit der die Brennelementtemperaturen so begrenzt werden, daß auch beim Kühlmittelverlust keine Spaltprodukte aus dem Reaktor zu entweichen brauchen. Der HTR-Modul nutzt die inhärenten Sicherheitseigenschaften des HTR, um die Strahlenexposition in der Umgebung auch bei auslegungsüberschreitenden Ereignisketten im Bereich der durch die Strahlenschutzverordnung gezogenen Grenzen für Auslegungsstörfälle zu halten, ohne auf aktive Systeme oder auswirkungsmildernde Maßnahmen angewiesen zu sein.

Hauptsicherheitsmerkmal des HTR-Moduls soll die Begrenzung der maximalen Kerntemperatur auf ca. 1600 °C unter allen Störfall- und hypothetischen Unfallbedingungen sein, so daß die Spaltprodukte fast vollständig im Brennelement eingeschlossen bleiben. Erreicht wird diese Temperaturbegrenzung durch die längliche Bauart und eine geringe Leistungsdichte. Beim Ausfall aller aktiven Kühlsysteme wird die Nachwärme passiv über die Oberfläche des Reaktor-druckbehälters abgeführt. Die Korrosion der Graphitbrennelemente durch Luft- oder Dampfzutritt, die zu einer Spaltproduktfreisetzung führen könnte, soll durch basissichere Behälter mit dünnen Abschlußleitungen beziehungsweise durch eine Begrenzung der Wasser- und Dampfzufuhr bei Lecks im Dampferzeuger auf tolerierbare Werte begrenzt werden. Zur Zeit läuft die Entwicklung eines korrosionsresistenten Brennelements mit einem Überzug aus Siliziumkarbid, das eine einfache Beherrschung von Störfällen mit Eindringen von Luft und Dampf erlauben würde. Eine Gefährdung der Umgebung bei allen anlageninternen Störfällen könnte damit vielleicht ausgeschlossen werden.

Zur Entsorgung von HTRen ist eine Wiederaufarbeitung noch weniger lohnend als bei LWRen, so daß hier von vornherein nur die direkte Endlagerung in Betracht kommt.

HTRen können Wärme bis ca. 950 °C liefern, also vor allem Prozeßwärme, und außerdem Elektrizität. Die Anlagekosten für den Modul-Reaktor sollen nach derzeitigen Schätzungen, in denen bereits Verbilligungen durch eine künftige Serienproduktion antizipiert sind, etwa DM 5200/kWe betragen, wenn je vier Reaktoren auf einen Standort konzentriert werden. Da es

noch nicht einmal eine Demonstrationsanlage gibt, sind diese Preisausgaben noch recht unsicher.

Eine gründliche Risikostudie – oder eine „risikoorientierte Studie“ wie beim Brüter – ist dem HTR bisher nicht gewidmet worden. Dies ist um so bedauerlicher, als der HTR unter allen Reaktorentwicklungen möglicherweise die geringsten Risiken ergeben würde. Auch eine weitergehende Beurteilung nach dem Kriterienraster der Energie-Enquete des Deutschen Bundestags (1980) ist bisher nicht erfolgt.

Unter Gesichtspunkten der CO<sub>2</sub>-Emissionsminderung ist der HTR für die Kohleveredelung, an die bisher als Anwendungsfeld dieses Reaktortyps vielfach gedacht worden war, wegen der erforderlichen CO<sub>2</sub>-Deposition wiederum nicht interessant. Ein anderes Bild ergibt sich für die Substitution fossiler Energieträger zur Prozeßdampfversorgung insbesondere der chemischen Industrie. Eine sehr optimistische Schätzung (A. Voß) kommt auf ein technisches Minderungspotential von insgesamt 30-35 Millionen Tonnen CO<sub>2</sub> an insgesamt etwa 30 Industriestandorten, an denen mindestens je zwei HT-Modulreaktoren zu bauen wären. Nach dieser Schätzung soll dieses Potential bis 2005 sogar bereits zu 70 Prozent wirtschaftlich nutzbar sein.

Um den hier angenommenen Bedarf bis 2005 zu decken, müßten ab 1997 je zehn HT-Modulreaktoren pro Jahr fertiggestellt werden und in Betrieb gehen. Für einen Reaktor, von dem derzeit noch nicht einmal eine Demonstrationsanlage existiert, ist damit schwerlich zu rechnen. Daß der HTR für die industrielle Prozeßdampferzeugung sehr sinnvoll eingesetzt und dabei zur CO<sub>2</sub>-Emissionsminderung wesentlich beitragen könnte, ist für die Zeit nach 2005 jedoch durchaus denkbar.

Ein weiterer, kleinerer Anwendungsbereich des HTR ist die Dampferzeugung zur tertiären Ölförderung, das heißt zum Dampffluten von Öllagern, wenn sie aus eigenem Druck kein Öl mehr nach oben fördern, mengenmäßig aber bei weitem noch nicht erschöpft sind. Denkbar ist ein CO<sub>2</sub>-Minderungspotential um 1 Millionen Tonnen CO<sub>2</sub> pro Jahr.

### 5.3.3 Brutreaktoren

Brutreaktoren optimieren die Plutoniumherzeugung aus Uran 238, die auch im LWR erfolgt, dahin gehend, daß mehr Pu239 entsteht als gespalten wird. Ihr Vorteil ist, auf diese Weise U238 erschöpfend zu nutzen. Probleme ergeben sich durch die große Energiedichte im Kern, deretwegen die Wärme durch flüssiges Natrium abgeführt wird, was wiederum in den Wärmetauschern zu Problemen führt. Natrium reagiert chemisch mit Wasser (zum Beispiel im Dampferzeuger und im Beton) und Luft. Kommt es zu einem Kühlmittelverlust im Reaktor und versagen die Abschaltssysteme, so ist wegen des positiven „Natriumvoid-Koeffizienten“ eine Reaktivitätssteigerung und „Leistungsexkursion“ (Kernexplosion im Reaktor) bis zur Zerstörung des Reaktorkerns nicht auszuschließen.

Brutreaktoren können Elektrizität und Wärme bis etwa 500°C liefern. Sie sind aber mit LWR-Kraftwer-

ken bei weitem noch nicht konkurrenzfähig. Der Preisabstand beträgt etwa einen Faktor zwei.

Weltweit sind mehrere Brüter bisher etwa 200 Reaktorbetriebsjahre gelaufen. In der Bundesrepublik Deutschland (ohne ehemalige DDR) gibt es nur den kleinen Versuchsreaktor KNK II in Karlsruhe und das Demonstrationskraftwerk in Kalkar, mit dessen Inbetriebnahme kaum noch zu rechnen ist. Eine „Risikoorientierte Studie“ zum SNR 300 in Kalkar hat ein maximales Schadensausmaß von 40 000 Toten ergeben, also spezifisch (pro  $\text{GW}_{\text{el}}$ ) deutlich mehr als für den viermal so großen LWR in Biblis (GRS 1982). Darüber hinaus bestehen massive Bedenken gegen die Sozialverträglichkeit des Brütters, weil diese Reaktoren einen geschlossenen Brennstoffkreislauf und somit den Einstieg in die Plutoniumwirtschaft erfordern.

Da Brutreaktoren sowohl vom Stand der technischen Entwicklung als auch von den Kosten und von den Risiken her noch wesentlich schlechter zu beurteilen sind als die derzeitigen Leichtwasserreaktoren, hat die Kommission sich mit dieser Reaktorlinie nicht eingehender befaßt. Es liegt auf der Hand, daß Brutreaktoren zur  $\text{CO}_2$ -Emissionsminderung bis 2005 nicht infrage kommen. Auch auf längere Sicht sind die Bedenken so groß, daß dieser Option unseres Erachtens keine weiteren Chancen eingeräumt werden können.

### 5.3.4 Fusion

Durch die Verschmelzung leichter Atomkerne zu Helium kann Energie freigesetzt werden. Unter vielen möglichen Fusionsprozessen ist besonders die Verschmelzung der Wasserstoffisotope Deuterium ( $\text{H}_2$ ) und Tritium ( $\text{H}_3$ ) von Interesse. Obwohl an der Fusionstechnik seit Jahrzehnten gearbeitet wird, ist ein technisch nutzbarer Fusionsprozeß bisher nicht entwickelt worden, so daß noch nicht einmal eine Demonstrationsanlage konzipiert werden kann. Noch viel weiter entfernt sind wir von einem Urteil über die Wirtschaftlichkeit, Umweltverträglichkeit etc. Unter den derzeitigen Entwicklungsperspektiven bedarf die Kernfusion zur Minderung der  $\text{CO}_2$ -Emissionen jedenfalls für die erste Hälfte des nächsten Jahrhunderts keiner weiteren Diskussion.

### 5.3.5 Abschließende Bewertung

Für die vergleichende Bewertung mit anderen  $\text{CO}_2$ -Reduktionsmöglichkeiten bis 2005 kommen nur die Leichtwasserreaktoren zur Elektrizitätserzeugung in Betracht. Auf dem nichtelektrischen Energiemarkt liegt die komparative Wettbewerbsfähigkeit der Atomkernenergie noch in weiter Ferne. Allerdings könnten mit der Zeit auch Hochtemperaturreaktoren einen Beitrag zur  $\text{CO}_2$ -Emissionsminderung leisten, der dem der LWRen vielleicht sogar vorzuziehen wäre, wenn dem HTR sowohl in der technischen Entwicklung als auch in der Technikbewertung größere Aufmerksamkeit gewidmet würde. Die Brütertechnik und die Fusionstechnik brauchen demgegenüber auch auf längere Sicht nicht weiter in Betracht gezogen zu werden.

Inwieweit den hier ermittelten  $\text{CO}_2$ -Minderungsmöglichkeiten der Atomkernenergie alternative Möglichkeiten zur Energiegewinnung zum Beispiel durch erneuerbare Energiequellen, durch Kraft-Wärme-Kopplung oder durch  $\text{CO}_2$ -arme fossile Energieträger und durch Möglichkeiten der Energieeinsparung vorzuziehen sind, ist nur durch weitergehende, gesamtsystemare Untersuchungen zu klären. Weitere Forschungsarbeiten sind auch notwendig, um die indirekten  $\text{CO}_2$ -Minderungspotentiale der Atomkernenergie durch Ausweitung der Strom- beziehungsweise Fern- und Nahwärmeversorgung zu quantifizieren und im Rahmen einer systemaren Gesamtanalyse zu bewerten. Nicht zuletzt sind die hier aufgezeigten  $\text{CO}_2$ -Minderungspotentiale und ihre spezifischen Minderungskosten durch Sensitivitätsanalysen zu fundieren.

Für die komparative Beurteilung der Leichtwasserreaktoren sind

- der Ausstieg aus der Nutzung der Atomkernenergie vor dem Auslaufen der heutigen Kraftwerke;
- das Auslaufenlassen dieser Kraftwerke;
- der Ersatz dieser Kraftwerke, wenn sie auslaufen, gegebenenfalls durch andere Reaktortypen, und
- der Zubau von Atomkraftwerken über den derzeitigen Bestand hinaus

als verschiedene Fälle zu beurteilen. Aus dem Kriterium, daß wir uns einer national eingegangenen Gefahr nicht dadurch entziehen dürfen, daß wir andere Länder verstärkt einer anderen Gefahr, der der Klimaänderung, aussetzen, folgt die Priorität der  $\text{CO}_2$ -Emissionsminderung gegenüber dem Ausstieg aus der Atomkernenergienutzung. Da aus Klimagründen kein vollständiger Ausstieg aus der Nutzung fossiler Energieträger erforderlich ist, bleibt es jedoch gleichwohl möglich, auch auf die Nutzung der Atomkernenergie zu verzichten.

Unabhängig von der Entscheidung hierzulande können wir heute nicht wissen, welche anderen Länder künftig Atomkernenergie nutzen werden. Wollen wir darauf hinwirken, daß dadurch weder diese Länder selbst noch andere Länder, also auch wir, gefährdet werden, so liegt es mit in unserer Verantwortung, wissenschaftlich und technisch zur ausreichend sicheren Nutzung der Atomkernenergie – wo immer in der Welt – beizutragen.

**Zusatzvotum der Kommissionsmitglieder  
Dr. Lippold (Offenbach), Fellner, Seesing,  
Frau Dr. Segall, Prof. Dr. Dr. Dolzer,  
Prof. Dr. Michaelis, Prof. Dr. Schikarski zu  
Abschnitt E, 4. Kapitel, Nr. 5.3**

**„Bewertung der Möglichkeiten zur Verminderung  
der  $\text{CO}_2$ -Emissionen durch Atomkernenergie von  
Prof. Dr. Meyer-Abich und Prof. Dr. Heinloth“**

Den Ausführungen von Herrn Prof. Dr. Meyer-Abich und Herrn Prof. Dr. Heinloth zu Abschnitt E, 4. Kapitel, Nr. 5.3 kann aus den folgenden Gründen nicht zugestimmt werden:

1. Dem Anspruch einer konsistenten vergleichenden Bewertung der Option Kernenergie wird der Text nicht gerecht, da ein Vergleich der Möglichkeiten einer Reduktion der CO<sub>2</sub>-Emissionen durch den Einsatz von Kernenergie mit anderen CO<sub>2</sub>-Minderungsmöglichkeiten anhand der Kriterien Wirtschaftlichkeit, Umweltverträglichkeit, Sozialverträglichkeit usw.<sup>1)</sup> nicht erfolgt, obwohl Untersuchungsergebnisse vorliegen, die insbesondere die Risiken verschiedener Energiesysteme für die menschliche Gesundheit und das menschliche Leben miteinander vergleichen.

2. Im Gegensatz zur Meinung der Autoren ist die Wirtschaftlichkeit der Kernenergienutzung in der Bundesrepublik Deutschland gegeben, wobei die Kosten der Entsorgung eingeschlossen sind. Bei 7000 h/a Ausnutzungsdauer ist derzeit die kWh aus Kernkraftwerken um 4,3 Pfennig billiger als die kWh aus Kohlekraftwerken, die mit deutscher Steinkohle betrieben werden.

Vorliegende Kostenabschätzungen einer Minderung von CO<sub>2</sub>-Emissionen durch Kernenergienutzung sind daher belastbar und weisen einen volkswirtschaftlichen Vorteil gegenüber anderen Optionen zur CO<sub>2</sub>-Minderung auf.

3. Die Sicherheit von Kernkraftwerken wird von den Autoren allein auf der Basis der sich auf Biblis B (Betriebsbeginn 1975) beziehenden GRS-Studie erörtert. Dabei bleiben anlageninterne Notfallmaßnahmen, die die Risikowerte um etwa eine Größenordnung herabsetzen, außer Betracht. Dies gilt für den bestehenden Kraftwerkpark.

Sollten die Möglichkeiten des Einsatzes der Kernenergie als Option zur Minderung von CO<sub>2</sub>-Emissionen konsequenter genutzt werden, so würde dies den Zubau von Kernkraftwerken erfordern, wobei dann die neueste Sicherheitstechnik mit erheblich geringeren Risikowerten zum Einsatz käme.

4. Sozialverträglichkeit ist ein in jeder Hinsicht unterschiedlich interpretierbares Kriterium, mit dem Ziel, politische Ziele argumentativ zu unterstützen. Da sich dieses Kriterium nicht quantifizieren läßt und keine abgestuft differenzierbare Einordnung zuläßt (allenfalls: Zustimmung oder Ablehnung) ist es nicht möglich, technische Systeme als mehr oder weniger sozialverträglich einzustufen. Darüber hinaus ist Sozialverträglichkeit von den exogen vorgegebenen Zahlen und Werten der Gesellschaft abhängig, welche selber mit der Zeit einem Wertewandel unterworfen sind und somit einer stabilen Definition der Sozialverträglichkeit entge-

genstehen. Die subjektive Bewertung der Analyse an diesem Punkt kann – auch wegen ihrer pauschalen Formulierung – nicht geteilt werden. So steht die Darstellung der Problematik der Sicherung von Kernkraftanlagen und der Vorverlagerung von Sicherungslinien in das gesellschaftliche Umfeld nicht im Einklang mit den empirischen Erfahrungen. Die Grundlagen unserer gesellschaftlichen Ordnung und die freiheitliche Rechtsstellung des Staatsbürgers sind durch die Einführung der Kernenergie auch in den vergangenen Jahrzehnten nicht gefährdet worden. Die freiheitlich-parlamentarische Demokratie unter der Herrschaft des Grundgesetzes hat sich trotz zeitweiliger schwerer Anfechtungen auch im Umgang mit Risiken gesellschaftlicher Art bewährt. Unsere Verfassung mit ihren vielfältigen Kontrollmechanismen und ihren weitestgehenden Sicherungen rechtsstaatlicher Garantien wird im internationalen Vergleich heute oft als vorbildlich angesehen.

5. Internationale Kontrollmaßnahmen haben erheblich zur Begrenzung des Proliferationsrisikos beigetragen, so daß die Nutzung der Kernenergie für friedliche Zwecke bisher nicht zu einer Verbreitung von Atomwaffen geführt hat. Plutonium zur Atomwaffenherstellung ist leichter auf anderen Wegen als durch Abzweigung aus dem Brennstoffkreislauf zu erlangen.

6. Die Nutzung der Kernenergie wird von den Autoren als Übergangstechnik bezeichnet, weil sie ein unverantwortliches Schadensausmaß besitze. Wenn dies so wäre, dann müßten alle Kernkraftwerke unverzüglich stillgelegt werden. Dies ist aber nicht der Fall und damit löst sich der Widerspruch: Gleichviel ob Übergangstechnik oder nicht, der bestehende Sicherheitsstandard deutscher Kernkraftwerke macht ihre Nutzung verantwortbar, dies umso mehr, als mit der Weiterentwicklung der Kerntechnik ihr Sicherheitsstandard steigen wird.

7. Die Reduktionsvariante mit Ausbau der Kernenergie zuzüglich einem (bezahlbaren) Beitrag durch rationellere Energieanwendung entsprechend den Studienergebnissen ergibt die höchste CO<sub>2</sub>-Minderung bis 2005, nämlich 45 Prozent.

8. Bei weiterem Ausbau der Kernenergie wäre eine Vorreiterrolle Deutschlands bei der CO<sub>2</sub>-Minderung möglich, und zwar ohne zusätzliche Belastungen der Volkswirtschaft.

9. Bei einem Verzicht auf die Kernenergie sind nur deutlich geringere Emissionsminderungsziele erreichbar, dies alles führt aber zu erheblich höheren volkswirtschaftlichen Belastungen als bei der Reduktionsvariante mit Ausbau der Kernenergie (Ersparnis 4,6 Mrd. DM/a). Das angestrebte CO<sub>2</sub>-Emissionsminderungsziel von etwa 30 % ist bei einem Verzicht auf die Kernenergie nur durch eine noch stärkere Einschränkung des Energieverbrauchs (24 % gegenüber 9 bzw. 14 % in den Szenarien „Hemmnisabbau“ bzw. „Energiepolitik“) und einem noch stärkeren Einsatz von Gas anstelle von Kohle und Öl zu erreichen.

<sup>1)</sup> Es sei angemerkt, daß die Enquete-Kommission „Zukünftige Kernenergie-Politik“ im Jahr 1980 keineswegs einstimmig empfohlen hat, die Akzeptabilität an den vier Verträglichkeitskriterien Wirtschaftlichkeit, Umweltverträglichkeit, Internationale Verträglichkeit und Sozialverträglichkeit zu messen. Es ist lediglich Einstimmigkeit über eine Arbeitshypothese getroffen worden. In der Endabstimmung haben die Parlamentarier der CDU/CSU-Fraktion diese Kriterien abgelehnt (vgl. BT-Drucksache 8/4341).

**Zusatzvotum der Kommissionsmitglieder Müller (Düsseldorf), Prof. Dr. Bach, Frau Prof. Ganseforth, Frau Dr. Hartenstein, Dr. Kübler zu Abschnitt D, 4. Kapitel, Nr. 5. „Zusammenfassung und Bewertung der Ergebnisse des Studienkomplexes ‚Nutzung der Kernenergie‘“**

**1. Einleitung**

Die schleichende Zerstörung der Umwelt einerseits und die Risiken komplexer Großtechnologien andererseits sind zwei zentrale Probleme, die sich bei einer Politik zum Schutz des Klimas stellen und im heutigen System der Energieversorgung strukturell miteinander verbunden sind. Aus der Sicht der o. g. Kommissionsmitglieder sind dauerhaft tragfähige Lösungen nur möglich, wenn sich die politischen Maßnahmen nicht auf kurzfristiges Krisenmanagement beschränken. Das erfordert zuerst eine Aufarbeitung der Ursachen des Dilemmas zwischen den technologischen Risiken und ökologischen Gefahren, um die Beziehungen zwischen Wirtschaft, Technik und Natur neu zu ordnen. Dies setzt ein genaues Verständnis von den Wechselwirkungen zwischen Umweltzerstörung und dem bisherigen Prozeß der industriellen Zivilisation voraus.

Im 19. Jahrhundert löste die industrielle Revolution die ständischen und feudalen Agrargesellschaften auf. Mit der Modernisierung der traditionellen Wirtschafts- und Lebensformen bildeten sich die Industriegesellschaften heraus. An der Wende zum 21. Jahrhundert verkehren sich jedoch die Vorteile und Erwartungen aus den industriellen Modernisierungsprozessen ins Gegenteil, frühere Sicherheiten und Zukunftsgewißheiten gehen verloren. Die industrielle Reichtumsproduktion wird in doppelter Hinsicht zur gesellschaftlichen Risikoproduktion: einerseits durch die Zwänge und Gefahren aus dem Einsatz (riskanter) Techniken und andererseits durch die zunehmend irreversiblen Schädigungen an den natürlichen Lebensgrundlagen. Eine Kontinuität dieser Form der Dynamik technisch-ökonomischer Modernisierung würde zur Ursache einer gesellschaftlichen Zäsur, die den Fortgang der Zivilisation insgesamt in Frage zu stellen drohte.

Die ‚Logik‘ der Wachstumsproduktion verzahnt sich immer enger mit technologischen Risiken und ökologischen Schädigungen und wird damit zu einer Bedrohung der gesellschaftlichen Entwicklung insgesamt. Damit verändert sich eine in der bisherigen Geschichte der Menschheit zentrale Problemstellung: Nicht mehr die soziale ‚Nutzbarmachung‘ der Natur ist die wichtigste Frage für die Entwicklung der Menschheit, auf der Tagesordnung steht immer deutlicher die Verhinderung der zerstörerischen Folgen aus Wachstum und Veränderung durch eine Beschränkung menschlicher Aktivitäten. Nicht alles, was machbar ist, darf auch gemacht werden.

Die maßlose Ausbeutung der Natur ist seit der industriellen Revolution zu einem integralen Bestandteil der gesellschaftlichen und ökonomischen Dynamik geworden. Als Folgerisiken des ‚Jahrhunderts der Ökonomie‘ (E. U. von Weizsäcker) mit seinen Verwer-

tungsmaßstäben und Marktprozessen, deren optimale Umsetzung im Zentrum wirtschaftlicher Interessen und gesellschaftlichen Entwicklung steht, werden sie gleichsam zivilisatorisch zugewiesen. Sie vergrößern sich systematisch mit dem Wachstum und der Komplexität der industriellen Maschinerie.

Die heutige Form der industriellen Entwicklung ist ein mehrfacher Angriff auf die Zeit. Sie kolonialisiert durch den verschwenderischen Ressourcenverbrauch die Vergangenheit, belastet die Gegenwart mit Risiken und Umweltschädigungen und wird für die Zukunft zu einer Hypothek, mit der die Vielfalt der möglichen Optionen in Frage gestellt werden. Unser Risikobewußtsein darf sich deshalb nicht allein auf die Gegenwart beziehen, sondern muß die Zukunft gleichrangig mitbeachten, vor allem die absehbaren Gefahren, die sich aus den massiven Eingriffen in die Umwelt ergeben können. Das erfordert eine Beendigung der dualistischen Aufteilung von Natur und Gesellschaft, die für das instrumentelle Fortschrittsverständnis der Neuzeit typisch ist. Gesellschaft kann aber nicht ohne die Natur sein und Natur kann heute nicht mehr ohne den Bezug zur Gesellschaft verstanden werden.

In der Organisation unserer Gesellschaft herrscht eine spezifische Rollenteilung vor: Einerseits werden primäre Entscheidungen ohne ausreichende Beachtung der Folgen getroffen. Dies ist vor allem auf die Mechanismen von Arbeitsteilung, Marktprinzip und Vorrang der Kapitalverwertung zurückzuführen. Andererseits liegt die nachträgliche Bewältigung der Risiken und Folgen in der Verantwortung staatlicher Regulierung. Diese Rollenteilung ist mit dem Anwachsen der Komplexität und der weiten Reichweite einzelner Entscheidungen in die Zukunft nicht mehr problemadäquat. Dabei sind es nicht allein einzelne Fehlentwicklungen, die das Defizit an Rationalität offenlegen, vielmehr steht die generelle Zunahme gesellschaftlicher Risiken in einem engen inneren Wechselverhältnis mit der Logik bisherigen Industrialisierungsprozesse.

Aus unserer Sicht muß zur Wiedergewinnung von Zukunft der Vorrang der Politik hergestellt werden, um eine dauerhaft sozial- und umweltverträgliche Entwicklung zu gestalten. Zur Entscheidung stehen dann nicht allein einzelne Aspekte, sondern vor allem die Antwort auf die Frage nach dem ‚Wohin‘ des industriellen Entwicklungsweges und der Legitimierbarkeit dieses Wohins. Eine solche Frage geht weit über eine verengte technische oder energiepolitische Problemstellung hinaus. Sie versucht vielmehr eine Bestandsaufnahme der Organisation und Kultur der Industriegesellschaft insgesamt. Dabei rückt die gesellschaftliche Gestaltung von Technik und Wirtschaft ins Zentrum der Politik und strategischer Zukunftsentscheidungen.

Die Gefahren einer weltweiten Klimaänderung und die Risiken aus der Nutzung der Atomenergie stehen

herausgehoben für die technischen und ökologischen Risiken moderner Industriegesellschaften. Sie sind dabei zwei Seiten einer Entwicklung. Die Atomenergie als Symbol für fragwürdige Großtechnologien und die Umweltzerstörung in erster Linie als Ergebnis der gewaltigen Steigerung im Energieumsatz.

Aus diesem Grundverständnis ergeben sich für die Bewertung, ob die Atomenergie einen wirksamen Beitrag für eine Klimaschutzpolitik leisten kann, drei Fragen:

1. Wie ist das Risiko der Atomenergie zu bewerten?
2. Ist angesichts der globalen Gefahren für das Klima eine Neubewertung und ggf. eine Veränderung der Prioritätensetzung erforderlich?
3. Besteht bei den heutigen Organisationsformen der Industriegesellschaften ein inneres Wechselverhältnis zwischen technologischen Risiken und ökologischen Gefahren?

## 2. Die Risiken der Atomenergie

Per Definition soll auch der größte anzunehmende Unfall (GAU) eines Atomkraftwerks technisch noch beherrschbar sein. Der angeblich undenkbarer Fall („faktisch nicht möglich“) einer Katastrophe wird als ‚Restrisiko‘ bezeichnet. Dieses Restrisiko wird von den Befürwortern definiert durch

- äußerst geringe Eintrittswahrscheinlichkeit,
- nicht kausal erfassbare Zusammenhänge zwischen bekannten Risikoquellen und möglichen Schäden sowie
- untolerierbar großes, maximales Schadensausmaß.

Ein derartiges Risiko bezeichnet Prof. Haefele als ‚hypothetisches Risiko‘. Die Existenz solcher, in Raum und Zeit entgrenzter Risiken entziehen sich der klassischen naturwissenschaftlichen Methode, eine Theorie im praktischen Experiment zu überprüfen. Sie lassen sich faktisch nur durch den tatsächlichen Eintritt ‚beweisen‘, dann, nach dem Irrtum, ist eine Korrektur jedoch nicht mehr möglich. Derartige hypothetische Risiken haben früher in Politik und Rechtsprechung stets als tolerierbar gegolten, da ihr Eintritt nach menschlichem Ermessen nicht zu erwarten seien.

Nach dem Atomunfall von Harrisburg im März 1979 wurde erstmals einer größeren Öffentlichkeit bewußt, daß die Möglichkeit eines GAU real ist und die Frage, ob die Atomtechnik außer Kontrolle geraten kann, keine lediglich theoretische Frage ist. 1986 hat, obwohl das gesamte Ausmaß der Folgen bis heute nicht bekannt ist, Tschernobyl die Möglichkeit eines Reaktorunfalls und ihre Dimension endgültig klar gemacht. Tschernobyl war die ‚Aktualisierung des Hypothetischen‘. Der Reaktorunfall hat gezeigt, daß die Atomenergie mit unvermeidbaren Risiken verbunden ist. Auch die ökonomische Unsinnigkeit der Atomenergie ist mit einer Schadenssumme von mindestens 300 Mrd. DM, wobei sich die schlimmsten Folgen für Mensch und Natur nicht in Geldgrößen erfassen lassen, deutlich geworden.

Nach Angaben von Vertretern der Bürgerbewegung in der Sowjetunion (Komitee ‚Kinder für Tschernobyl‘) sind bereits mehr als 3 000 Menschen an den Folgen der Reaktorkatastrophe gestorben und die IAEA vermutet rund 24 000 zusätzliche Krebstoten in der UdSSR. Im Umkreis von Tschernobyl ist dauerhaft menschliches Leben nicht mehr möglich. In der Eva-

kuierungszone mit einem Radius von 30 km um den Atommeiler wohnten ca. 130 000 Menschen. Ginge man von einer vergleichbaren Evakuierungsmaßnahme in der Bundesrepublik aus, müßten zwischen 500 000 und 2 Millionen Menschen in wenigen Stunden evakuiert werden. Dies ist nicht möglich.

Die atomare Wolke hat z. B. auch in Weißrußland ein Gebiet, in dem 2,2 Mio. Menschen, darunter über 500 000 Kinder, leben, hochgradig verseucht. Mindestens 60 000 Kinder müßten sofort umgesiedelt werden. Krebserkrankungen, Immundefekte, Erbgutveränderungen und Mißbildungen nehmen erschreckend zu. Erst langsam wird das gesamte Ausmaß der Strahlenverseuchung klar, denn bisher liegen keine Erfahrungen über die Wirkungen langjähriger radioaktiver Niedrigstrahlungen vor.

Nach Angaben der Bürgerkomitees der Sowjetunion und von Volksdeputierten des Obersten Sowjets werden die bisherigen volkswirtschaftlichen Schäden von Tschernobyl auf 90 bis 100 Mrd. Rubel geschätzt. Das sind rund 300 Mrd. DM.

Die Wahrscheinlichkeit eines großen (noch größeren) Reaktorunfalls mag rechnerisch noch so klein sein (was sie aber auch nach den Studien der Reaktorsicherheitskommission nicht ist), er kann nicht ausgeschlossen werden. Kein technisches System verfügt über eine absolute Sicherheit, von menschlichen Fehlern oder Sabotage ganz zu schweigen. Technische Sicherheit kann erhöht, aber nicht gewährleistet werden. Eine Technik, gegenüber der Menschen nicht versagen dürfen, ohne daß ein ganzer Kontinent in Angst und Schrecken gejagt wird und eine große Zahl von Menschen daran zugrunde geht, ist nicht menschengerecht. Menschliches Versagen oder menschlicher Zerstörungswahn hätten bei der Atomenergie Folgen, die nicht verantwortbar sind.

Nicht der Mensch muß sich den Zwängen einer von ihm geschaffenen Technik unterordnen, vielmehr muß die Technik ein Instrument für die Verbesserung der Lebensbedingungen sein. Tatsächlich ist die Nutzung der Atomenergie jedoch mit großen Zwängen, Einschränkungen und Kontrollmechanismen (einschließlich der Gefährdung von Grundrechten) verbunden, um Risiken zu minimieren und Mißbrauchsmöglichkeiten auszuschließen. Zudem ist der atomare Müll eine Belastung für künftige Generationen über tausende Jahre. Bis heute ist die ‚Entsorgung‘ des Atom Mülls ungeklärt. In keinem Land der Erde gibt es nach über 30 Jahren ziviler Nutzung der Atomenergie ein Endlager für den hochaktiven Atom Müll oder eine andere sichere Form der Entsorgung.

Unfälle sind auch durch eine noch so hoch entwickelte Sicherheitstechnik nicht völlig auszuschließen. Die Sicherheit von Atomkraftwerken wird in Wahrscheinlichkeiten angegeben. Sie erlauben jedoch keine Aussage über das ‚Wann‘ einer möglichen Katastrophe, sie sind Erwartungswerte für die relative Häufigkeit eines Ereignisses. Wer diese Gefahr nicht eingehen will, der muß den geordneten Ausstieg aus der Atomenergie planen und durchsetzen. Tschernobyl war die letzte Warnung.

Im gesamten, dem Atomkraftwerk vor- und nachgelagerten Nuklearkreislauf existieren weitere Risiken.

Vom Abbau des Natururans über seine Anreicherung, die Herstellung der Brennelemente bis hin zu Atomtransporten, Wiederaufbereitung oder Endlagerung ist jeder Schritt im Brennstoffkreislauf mit spezifischen, mehr oder minder großen, aber nie zu ignorierenden Risiken verbunden. Die größte Gefahr geht von einem Einstieg in die Plutoniumwirtschaft aus, hier liegt die brisanteste Schnittstelle zwischen militärischer und ziviler Nutzung.

Auch die Nukleartransporte bergen die Gefahr eines Verstoßes gegen den Nichtverbreitungsvertrag von atomarem Know-how wie die Beispiele Argentinien, Brasilien, Pakistan, Irak, Indien oder Südafrika belegen. Alle weltweit betriebenen Atomreaktoren eröffnen die Möglichkeit des militärischen Mißbrauchs. Damit steigt die militärische Bedrohung der Menschheit, denn letztlich bleibt die Trennung zwischen ziviler Nutzung und dem mißbräuchlichen Bau von Atombomben theoretisch.

### 3. Neubewertung der Atomenergie?

Angesichts der globalen Bedrohung einer weltweiten Klimaänderung werden von den Befürwortern Argumente für eine Neubewertung der Atomenergie angeführt. Zur Verringerung der Treibhausgasemissionen, die die Wärmebilanz und den Energiehaushalt der Atmosphäre verändern, so lautet die Hauptthese, muß es zu einer schnellen Reduktion der fossilen Brennstoffe kommen. Dieser richtigen und allseits zustimmungsfähigen Aussage wird dann jedoch eine einfache, aber in der Sache unzureichende Antwort zugeordnet. Dafür sei die ‚kohlenstofffreie‘ Atomenergie die effektivste und wirtschaftlichste Methode. Die neue Formel heißt ‚Atomenergie und Einsparen‘. Politische und wissenschaftliche Seriosität erfordert es, sich auch mit diesen Argumenten auseinanderzusetzen. (Die o. g. Kommissionsmitglieder verweisen hierzu insbesondere auf ihr Votum zu den nationalen Handlungsmöglichkeiten zur Reduktion energiebedingter Treibhausgase.)

Jede wirksame Politik zum Schutz des Klimas erfordert tiefgreifende Einschnitte in das heutige Energiesystem. Dafür gibt es, soll, wie von der Enquete-Kommission zum Schutz der Erdatmosphäre gefordert, eine mindestens 30 prozentige Reduktion der energiebedingten Treibhausgase bis zum Jahr 2005 erreicht werden, keine ‚einfachen‘ Lösungen. Jede wirksame Strategie des Klimaschutzes hat tiefgreifende Einschnitte in die Energieversorgung zur Folge und erfordert von daher eine breite Akzeptanz in der Gesellschaft. Der Schutz des Klimas ist von daher in erster Linie eine Frage des politischen Gestaltungswillens und der Überzeugungskraft, die ein Konzept der Neuordnung der Energieversorgung hat, die Probleme dauerhaft zu lösen. Die o. g. Kommissionsmitglieder sind der Auffassung, daß die Bereitschaft der Bevölkerung, eine tiefgreifende Veränderungen der Energieversorgung zu unterstützen, nicht gegeben ist, wenn damit ein erneuter Ausbau der mehrheitlich abgelehnten, riskanten Atomtechnologie verbunden ist.

Die von den ‚Koordinatoren‘ erarbeiteten Energieszenarien belegen, daß sich Klimaschutz mit dem Aus-

stieg aus der Atomenergie vereinbaren läßt. Insofern ist die Behauptung falsch, daß das Risiko der Atomenergie eingegangen werden muß, weil es im Vergleich zu den Klimagefahren nur gering sei. Hier liegt der klassische Fall eines Vergleichs von Nichtvergleichbarem vor. Oder anders gesagt: Dahinter steht eine ebenso einfaltslose wie durchsichtige Interessenpolitik.

Neben den in Punkt 2. genannten Gründen zur Ablehnung der Atomenergie heben die o. g. Kommissionsmitglieder insbesondere folgende Aspekte hervor:

- Die angeblich inhärent sicheren Atomkraftwerke existieren nur auf dem Papier, der angepriesene Hochtemperaturreaktor kommt am Standort Hamm-Uentrop nicht über seine Probephase hinaus. Er wird von Bund und Land NRW stillgelegt.
- Für die in der Ausbauvariante vorgesehenen 30 Standorte für Hochtemperaturreaktorne gibt es keine reale Grundlage — weder planungsrechtlich noch von einer (Standort- und Technik-)Zustimmung der Bevölkerung.
- Die höhere Wirtschaftlichkeit der Atomenergie wird nur rechnerisch erreicht — tatsächlich sind z. B. die angenommene höhere Nutzungsdauer und längere Lebensdauer unrealistisch und widersprechen den Praxiswerten.
- Für den entscheidenden Zeitraum bis zum Jahr 2005 kann die Atomenergie aufgrund ihrer langen Planungszeiträume und ihrer im Vergleich zur Einsparung höheren Kosten keine schnell wirksamen Beiträge für den Klimaschutz leisten.
- Die Entsorgungsrichtlinien der Bundesregierung (nationales Entsorgungskonzept) können bis heute nicht erfüllt werden.
- Bei der strategischen Entscheidung für die Energieversorgung heißt die Alternative ‚Festhalten an dem angebotsorientierten Wachstumskurs mit Atomenergie‘ oder ‚nachfrageseitige Neuordnung effizienter Energienutzung und Ausbau der Solarwirtschaft‘.

Trotz des gewaltigen finanziellen Aufwands ist der weltweite Beitrag der Nukleartechnik an der Energieversorgung gering geblieben. Und jede Prognose der Entwicklung des vorhandenen (d. h. angebotsorientierten) Energiesystems kommt zu einem weiterhin hohen Energiewachstum und — trotz eines massiven Ausbaus der Atomenergie — zu einem weiterhin starken Anstieg der Kohlendioxid-Emissionen. So steigen sowohl in der Studie der Weltenergiekonferenz von Cannes (FUSER-Studie von 1986/Verzwölfachung des AKW-Anteils) als auch in dem Vorschlag der 14. Weltenergiekonferenz von Montreal (1990/Vervierfachung des Atomstroms) die Kohlendioxid-Emissionen unvermeidbar an. In beiden Fällen hätte dies katastrophale Folgen für das Klima.

Die o. g. Kommissionsmitglieder weisen darauf hin, daß es für eine Klimaschutzpolitik nicht möglich ist, lediglich kohlenstoffhaltige Energieträger gegen die ‚kohlenstofffreie Atomenergie ‚auszutauschen‘ und mit den ermittelten Einsparpotentiale zu kombinie-

ren. Vielmehr müssen die systemaren Zusammenhänge der jeweiligen Energieversorgung beachtet werden: Mit dem System der Atomenergie sind spezifische energiewirtschaftliche, technologische und organisatorische Zwänge und Strukturen verbunden, die z. B. effizientere Energienutzung, Kraft-Wärme-Koppelung und Techniken auf der Basis regenerativer Energieträger blockieren. Bereits die bisherige Konzentration von Kapital, Know-how und Forschungsmitteln auf den Ausbau der Atomenergie hat die Entwicklung umweltverträglicherer und ökonomisch sinnvoller Alternativen gehemmt. Diese empirisch belegbare Behauptung widerspricht der Behauptung, daß die Atomenergie einen wesentlichen Beitrag zur Klimastabilisierung geleistet habe und zukünftig leisten könne.

Für den kurzen, aber entscheidenden Zeitraum für notwendige Klimaschutzmaßnahmen bis zum Jahr 2005 blockiert gerade die Großtechnologie Atomenergie mit ihren betriebswirtschaftlichen Zwängen und ihrer geringen Nutzungseffizienz den schnellen Umbau zu einer Gesellschaft, die rationeller und umweltverträglicher mit Energie umgeht.

#### **4. Wechselverhältnis zwischen industrieller Entwicklung einerseits und technologischen Risiken / ökologischen Gefahren andererseits**

Die These der o. g. Kommissionsmitglieder ist, daß die Gefährdungen der Zukunft auf die ungebremste Dynamik industrieller Prozesse zurückgeht. Alle gesellschaftlichen Konzepte der Neuzeit sind auf die ‚Rationalisierung‘ technisch-ökonomischer Wachstumsprozesse ausgerichtet und mißachten die zerstörerischen Wechselbeziehungen mit den ökologischen Grundlagen. Sie haben damit ihre Rechnungen ohne die Natur gemacht.

Mit der industriellen Revolution vollzog sich eine weltgeschichtliche Zäsur erster Ordnung. Technik und Wissenschaft wurden zu den entscheidenden Produktivkräften, die durch Arbeitsteilung, Automation, Funktionstrennung und Mobilität eine intensive Nutzung von Raum und Zeit möglich machten. Zur Triebkraft der Umwälzungen wurde die rasche Verwertung von Kapital. Die moderne Technik löste die Fesseln für eine gewaltige Dynamik von Wachstum, Beschleunigung und Veränderung. Kennzeichnend hierfür sind die fortgesetzte ‚Entgrenzung‘ in der zeitlichen und räumlichen Dimension sowie die ‚Grenzenlosigkeit‘ in der Erzeugung von Produkten und in der Nachfrage nach Energie. Damit setzte sich das industriewirtschaftliche Wachstumsmodell durch, weltweit orientiert sich die Entwicklung von Gesellschaften an dem industriellen Beschleunigungs-Fortschritt-Paradigma.

Die Folgen sind neben sozialen und kulturellen Veränderungen vor allem eine wachsende Komplexität der gesellschaftlichen Strukturen sowie ihre zunehmende Abhängigkeit von wirtschaftlichem Wachstum und ständigen technischen Neuerungen. Der objektive Übergang von der statischen Gleichgewichtswirtschaft zur systematischen Ausbeutung der Natur ist das Kennzeichen für die Veränderungen in den Wechselprozessen zwischen Ökonomie und Ökologie

der Neuzeit. Das industriewirtschaftliche Wachstumsmodell führt einerseits zur Freisetzung/Entkoppelung von Akteuren, Organisationen und Teilsystemen aus dem starren Verhältnis zum Ganzen bzw. zu anderen Teilsystemen sowie andererseits zur Auflösung traditioneller Festlegungen und Selbstverständlichkeiten. Dies wurde bis in die letzten Jahre nahezu unkritisch als Grundlage für eine progressive Bewegung der Gesellschaft nach ‚vorn‘ gesehen und als Fortschritt verstanden. Gerade aber dieser Prozeß ist zum prekären Ausgangspunkt für die weitere Zukunft geworden, bei dem sich technologische Risiken und ökologische Gefahren eng verzahnen.

Durch die industrielle Dynamik werden die ökonomischen und technischen Systeme maß- und schrankenlos, geradezu ‚unersättlich‘ in der Verfolgung ihrer Teilziele. Während die Ausdifferenzierung und Leistungsfähigkeit der Teilsysteme zunimmt, nimmt die Gesamtordnung jedoch eine immer größere Starrheit an. Eine ‚systemische‘ Blindheit entsteht gegenüber den ökologischen und längerfristigen Folgen der industriellen Modernisierungsprozesse, während die Rationalität der gesellschaftlichen Ordnung insgesamt abnimmt.

Was sich vor allem in den letzten beiden Jahrzehnten als besonders problematisch erweist, sind Tempo, Umfang und Komplexität der Wechselbeziehungen, mit denen sich wirtschaftliches Wachstum und technologische Veränderung im Verhältnis zur Natur vollziehen. Die historisch beispiellose Ausbreitung von Technik und Kapital gefährdet heute das Erdökosystem insgesamt. Denn Wirtschaft und Lebensstil lassen sich nicht beliebig gegen die Natur organisieren.

Das umweltgefährdende Zerstörungspotential und die technologischen Risiken der entwickelten Industriegesellschaften müssen in den Verschränkungen und der Gesamtheit gesehen werden. Die gemeinsame Ursache ökologischer Schäden und technologische Risiken/Zwänge liegt in der bisherigen ‚Logik‘ der industriellen Dynamik und ihrer Verwertungsformen selbst. Von daher ist der ökologische Umbau der Gesellschaften die entscheidende politische Aufgabe, um eine insgesamt risikominimierende und umweltverträgliche Entwicklung einzuleiten.

#### **Zusatzvotum des Kommissionsmitglieds Dr. Knabe zu Abschnitt E, 4. Kapitel, Nr. 5.3 „Bewertung der Möglichkeiten zur Verminderung der Kohlendioxid-Emissionen durch Atomkernenergie von Prof. Dr. Meyer-Abich und Prof. Dr. Heinloth“**

##### **1. Die dreifache Gefährdung der Erdatmosphäre**

Die Menschheit ist mit der zunehmenden Belastung der Erdatmosphäre im Begriffe, ihre eigenen Lebensgrundlagen irreversibel zu schädigen. Gefährdet ist die Erdatmosphäre in dreifacher Weise:

- akut durch die tägliche Gefahr der Freisetzung von Radioaktivität, die den Super-GAU von Tschernobyl noch übertreffen könnte,



- durch Prozesse, die den stratosphärischen Ozonschild unerwartet schnell abbauen und damit das Leben auf der Erde zunehmend schädlicher UV-Strahlung aussetzen, und
- durch klimawirksame Schadstoffe, die Temperaturerhöhungen von katastrophalem Ausmaß zu verursachen drohen.

Die Menschheit steht vor der unerhörten Herausforderung, alle drei Gefahren auf einmal abwehren zu müssen.

Am dringlichsten ist wegen der unmittelbaren, jeden Tag möglichen Katastrophe in einem Atomkraftwerk die Ausschaltung dieser Gefahrenquelle durch Stilllegung aller dieser Anlagen. Auch dann bleibt noch die langfristige Aufgabe, die radioaktiven Abfälle möglichst von den Stoff- und Nahrungskreisläufen fernzuhalten.

Sofortmaßnahmen sind ebenfalls gegen die weitere Produktion und Verwendung der ozonzerstörenden FCKW und Halone zu ergreifen vor allem, weil sie Verweilzeiten von über 100 Jahren in der Stratosphäre besitzen.

Am schwierigsten ist jedoch die Aufgabe, die sogenannten Treibhausgase – insbesondere aus dem Energiesektor – auf ein Mindestmaß zu reduzieren, weil hierbei alle gesellschaftlichen Bereiche erfaßt werden und die moderne Zivilisation der Erde ohne ausreichende Energieversorgung nicht vorstellbar ist.

## 2. Die vergebliche Suche nach einem Grundkonsens über die Bewertung der Atomenergie

Mit dem Beitrag von Meyer-Abich/Heinloth über die Bewertung der Kernenergie wurde angestrebt, einen Grundkonsens hinsichtlich der Rolle der Kernenergie bei der Bekämpfung der Klimagefahren vorzubereiten. Angestrebt wurde eine „faire Bewertung“ der Kernenergie. Die Verwendung des Wortes „fair“ legt nahe, daß sich die Autoren der divergierenden Positionen bewußt sind, und daß sie aus ihrer Sicht (d. h. aus der Sicht von Atomenergiebefürwortern) „fair“ auch im Sinne der Gegenposition (d. h. der Atomenergiekritiker) argumentieren wollen. Doch der Text zeigt die Unlösbarkeit der Aufgabe, beide Positionen zu vereinen.

So beginnt der Text mit dem Ansatz, die Rolle der Atomenergie im Hinblick auf den Treibhauseffekt zu betrachten, wogegen die erste und zentrale Frage lauten muß: Wie muß Klimaschutz als Teil des Schutzes der Atmosphäre und Biosphäre aussehen? Die Antwort darauf heißt: Ein umfassender Klimaschutz muß alle drei Gefahren für die Atmosphäre und Biosphäre abwehren, also radioaktive Verseuchung, Ozonabbau und den Treibhauseffekt. Daraus folgt: Bereits die Prämisse, auf der der Text aufbaut, ist falsch. Atomenergie kann als Lösung des Problems nicht in Frage kommen, da vor ihr selbst zu schützen ist.

## 3. Ausstieg aus der Kernenergie ist kein Widerspruch zur CO<sub>2</sub>-Minderung sondern eine Vorbedingung

Das Argument, daß die Atomenergietechnologie und die darauf aufbauenden Energieversorgungsstrukturen Kohlendioxid-Emissionen vermindern, überzeugt nicht: denn es geht nicht um den Vergleich, wieviel CO<sub>2</sub> sich einsparen läßt, wenn der Strom statt in einem Steinkohle- in einem Atomkraftwerk erzeugt wird, sondern um den Energieverbrauch des Systems, um die Bewertung der Energiestruktur. Eine einfache Subtraktion von Energieäquivalenten aus Atomkraftwerken von den CO<sub>2</sub>-Emissionen fossiler Kraftwerke ist deshalb nicht zulässig. Eine auf Atomkraftwerken und somit auf einer Großtechnologie aufbauende Energiestruktur verursacht nicht nur die Gefahr einer radioaktiven Verseuchung, sondern fördert einen auf Zuwachs angelegten, angebotsorientierten Energiemarkt auf der Basis von Energieverschwendung. Eine auf Atomenergie gegründete Energiepolitik behindert damit eine umweltverträgliche(re) Energieversorgung. Erst dezentrale Strukturen ermöglichen eine Energieversorgung, die unter weitestgehender Ausnutzung von Energiesparpotentialen und erneuerbaren Energiequellen optimal an den Energiebedarf vor Ort angepaßt ist. Anders ausgedrückt, der Ausstieg aus der Atomenergie ist sogar unerläßliche Voraussetzung dafür, eine massive CO<sub>2</sub>-Reduktion zu erreichen, zumal durch den Ausstieg auch die Impulse für die notwendigen Strukturveränderungen gegeben werden. Dieser Zusammenhang wird in den Stellungnahmen von Peter Henricke u. a., denen hier voll und ganz zugestimmt wird, ausführlich erläutert.

## 4. Atomenergie ist international und sozial unverträglich

Als Gefahren, die von der Atomenergiewirtschaft ausgehen, werden im Text von Meyer-Abich/Heinloth deren Mängel bzgl. der „internationalen“ sowie „sozialen Verträglichkeit“ angesprochen. Doch obwohl der Zusammenhang zwischen ziviler und militärischer Nutzung der Kernenergie problematisiert wird, und obwohl die Atomenergie „hinsichtlich der inneren Ordnung“ als „problematisch“ eingestuft wird, werden diese Aspekte nicht hinreichend berücksichtigt. Allein die Punkte „internationale Sicherheit“ und „Demokratie- bzw. Sozialverträglichkeit“ sind von vornherein Ausschlußgründe für die Nutzung der Atomenergie.

## 5. Freisetzung von Radioaktivität beim Uranabbau

Die Folgen von Uranabbau und -verarbeitung werden in Kap. 4, 5.3 wie auch in der öffentlichen Diskussion vernachlässigt, obwohl sie ein großes internationales Problem darstellen. Infolge des Uranabbaus werden Schadstoffe, für deren Wahrnehmung die Sinnesorgane des Menschen nicht ausgerüstet sind, aus den Lagerstätten an die Erdoberfläche gefördert und damit der Verbreitung im Wasserkreislauf und in den

Nahrungsketten der Biosphäre ausgesetzt. Die heutige Technik ist dieser Problembewältigung nicht gewachsen.

Betroffen vom weltweiten Uranabbau sind vor allem Gebiete in Nordamerika, Australien und Namibia, aber auch in Sachsen und Thüringen. 60 % des weltweiten Uranabbaus erfolgen auf dem Land indigener Völker, die weder gefragt, noch gewarnt oder in irgendeiner Weise geschützt wurden. Dies kann nur als schwere Menschenrechtsverletzung bezeichnet werden. Doch viele Opfer leben mitten in Deutschland, wo die Abraumhalden des Uranbergbaus der Wismut AG zur radioaktiven Verseuchung vieler Gemeinden führen.

### **6. Die ungelöste Endlagerung radioaktiver Abfälle verlangt nach dem Ausstieg aus der Atomenergie**

In Nr. 5.3 wird ausführlich beschrieben, wie die geplante Endlagerung des radioaktiven Mülls vollzogen werden soll. Eine Bewertung der Endlagerung erfolgt jedoch nicht, auch wenn die Gefahr angesprochen wird, daß Radioaktivität über Eindringen von Grundwasser in die Deponien an der Oberfläche freigesetzt werden kann, und Rechnungen über die an die Oberfläche gelangende Radioaktivität zitiert werden. Stattdessen wird festgestellt, daß zumindest vorläufig unklar bleibt, „was mit dem Atommüll letztlich geschehen soll“. Angesichts der Zeithorizonte von Jahrhunderttausenden bis zum Abklingen der Radioaktivität, was jede historische Dimension sprengt, kann die einzige Antwort auf die fehlenden Entsorgungsmöglichkeiten für radioaktive Abfälle deshalb nur der Ausstieg aus der Atomenergie sein.

### **7. Verantwortung gegenüber der Dritten Welt**

Der Ausstieg aus der Atomenergie darf nicht auf Kosten anderer, speziell der Dritte-Welt-Länder gehen. Hier stimmen die eigenen Standpunkte und die von Meyer-Abich/Heinloth überein. Die in deren Text abgeleitete Schlußfolgerung, daß die Minderung von Kohlendioxidemissionen Vorrang vor dem Ausstieg aus der Atomenergie hat, wird jedoch nicht geteilt. Dieser Schluß ist auch falsch:

1. Im Grundsatz haben der Schutz vor Klimaänderungen, Ozonabbau und radioaktiver Verseuchung gleichrangige Bedeutung. Wer könnte die verschiedenen Gefahrenpotentiale quantitativ gegeneinander aufrechnen? Nur wegen des jederzeit möglichen Eintritts einer Katastrophe in einem Atomkraftwerk verdiente die Abwehr der Radioaktivität erste Priorität. Dies erkennen selbst konservative Politiker in ihrem Zusatzvotum an, nur bestreiten sie die Gefährdung.

2. Der Schutz vor Klimaänderungen und der vor Ozonzerstörung steht nicht in Konkurrenz mit dem Schutz vor atomarer Verseuchung.
3. Voraussetzung für einen wirksamen Klimaschutz ist gerade der Ausstieg aus der Atomenergie (vgl. Stellungnahme von Peter Henricke u. a.).

Verantwortung für die Dritte Welt, die in Zukunft wahrscheinlich am meisten unter den Klimaänderungen zu leiden haben wird, bedeutet konkret:

- den CO<sub>2</sub>-Ausstoß in den Industrieländern erheblich zu verringern: durch Energiesparen, effiziente Energiebereitstellung, regenerative Energieträger — nicht durch Atomkraftwerke
- den wachsenden Energiebedarf in den Dritte-Welt-Ländern nicht durch den Export von Atomkraftwerken und Großtechnologien zu decken, sondern die Energieversorgung in kleinräumigen Strukturen zu unterstützen und einen Technologietransfer für regenerative Energien und kleine, effiziente Kraftwerkseinheiten vorzunehmen. Auch aus Verantwortung gegenüber der Dritten Welt muß sofort — wie in meinem Zusatzvotum zu Abschnitt E ausgeführt wurde — gehandelt werden.

### **8. Schlußfolgerung: Die Alternative — CO<sub>2</sub>-Reduktion und Sofortausstieg aus der Atomenergie**

Im Bewußtsein der Gefahren und aus Verpflichtung gegenüber der Mit- und Umwelt ist eine umfassende Gefahrenabwehr erforderlich. Um dies zu verwirklichen sind zwei „Ausstiege“ nötig:

1. der Ausstieg aus der Atomenergie
2. der Ausstieg aus Energieversorgungsstrukturen, die auf Großkraftwerken basieren.

Diese Maßnahmen sind die ersten Schritte aus dem Weg zu einer klima- und umweltfreundlichen Energieversorgung.

Eine Diskussion darüber, welche Rolle die Atomenergie bei der Bewältigung der Klimagefahren zukünftig spielen kann, verstellt den Blick für das Wesentliche, d. h. für die vordringlich notwendigen Maßnahmen gegen die drohende Klimakatastrophe.

Die Forderung nach dem zweifachen Ausstieg steht nicht im luftleeren Raum, sondern ist durch Studien untermauert. Die Studie des Öko-Instituts „Das CO<sub>2</sub>-optimierte GRÜNE Energiewende-Szenario 2010“ vom August 1990 war von den GRÜNEN im Bundestag in Auftrag gegeben worden, da die Enquete-Kommission nur den Ausstieg bis 1995, nicht aber den Sofortausstieg bis 1991 untersucht hatte. Die wichtigsten Eckwerte dieser Studie sind folgende:

Den Herausforderungen des Klimaschutzes wird die Energiepolitik nur gerecht, wenn sie

- die Effizienz der Energie-Produktion erheblich verbessert,

- die vorhandenen Energie-Spar- und Abwärme-Potentiale optimal ausnutzt
- die erneuerbaren Energien forciert einführt.

Dabei ist bis zum Jahre 2010 eine Reduktion des Primärenergieverbrauches von ca. 45 % möglich, trotz eines angenommenen Wirtschaftswachstum des Brutto- sozialproduktes von 2,4 % jährlich. Der Stromverbrauch kann bis zu einem Drittel gesenkt werden. Die erneuerbaren Energien können dabei schon 2010 mit einem Beitrag von ca. 77 TWh/a über 30 % der Stromnachfrage decken.

Der Einsatz von Braunkohle kann um 18 auf 9 Mio. t SKE, der von Steinkohle um 32 auf 36 Mio. t SKE reduziert, die Verwendung von Öl auf 75 Mio. t SKE halbiert und der Gaseinsatz nach einer AKW-ausstiegsbedingten Erhöhung auf dem derzeitigen Niveau stabilisiert werden.

Möglich wird dies nur durch den energischen Aufbau von öffentlichen und industriellen Kraft-Wärme-Kopplungsanlagen. Ihr Anteil an der Stromerzeugung steigt absolut auf das Achtfache, relativ wegen der gleichzeitigen Senkung des Stromverbrauchs von heute 5 % auf ca. 62 % im Jahre 2010.

Dieser Ausbau der Kraft-Wärme-Kopplung ist nur mit einer Änderung der heutigen hoch-zentralisierten Energieangebotsstrukturen zu erreichen. Notwendig ist daher die Rekommunalisierung und Demokratisierung der Energieversorgung, da nur ‚vor Ort‘ eine realistische Abschätzung und optimale Ausnutzung von Energiespar-Potentialen und erneuerbaren Energiequellen möglich ist. Erst wenn die Verantwortung für die Energieversorgung in die Hände von Gemeinden und Kommunen zurückgeführt wird, ist die Umwandlung der heutigen Energieversorgungs- in Energiedienstleistungs-Unternehmen möglich; denn der/die VerbraucherIn benötigt nicht die Energie, sondern die damit zusammenhängenden Dienstleistungen: die Bereitstellung von Wärme, Licht und Kraft sowie effiziente Geräte, unabhängige Beratung, Finanzierung und Einsatz von Energie-Spar-Technologien.

In vielen Bundesstaaten der USA wird dieses Prinzip bereits erfolgreich praktiziert: Würde das strategische Stromsparen mit Hilfe von Least-cost-planning (Planung der minimalen Kosten), wie es dort bereits Anwendung findet, auch in der Bundesrepublik betrieben, könnte dem Stromsparen eine Chance gegeben werden. Es ist durch zahlreiche Studien und die vielen Detailarbeiten der Enquetekommission bewiesen, daß eingesparter Strom für den Verbraucher erheblich kostengünstiger ist, als neu erzeugter Strom. Volkswirtschaftliche Vernunft könnte aus der Energiequelle Stromsparen gewaltige Potentiale erschließen — dem stehen heute aber noch die großen Energieversorger entgegen.

Diese Ausführungen skizzieren die Notwendigkeit einer Neustrukturierung der Energiewirtschaft. Damit belegen sie gleichzeitig, daß eine klima- und umweltverträgliche Energieversorgung mit einem sofortigen Ausstieg aus der Atomenergie technisch und wirtschaftlich machbar, ja sogar nur auf diese Weise realisierbar ist. Konkrete Maßnahmen sind in meinem Zusatzvotum zu Abschnitt E im Detail aufgeführt.

### **Zusatzvotum der Kommissionsmitglieder Prof. Dr. Bach und Prof. Dr. Henicke zu Abschnitt E, 4. Kapitel, Nr. 5.3: „Bewertung der Möglichkeiten zur Verminderung der Kohlendioxid-Emissionen durch Atomkernenergie von Prof. Dr. Meyer-Abich und Prof. Dr. Heinloth“**

Von den Autoren Prof. Dr. Heinloth und Prof. Dr. Meyer-Abich wird der Versuch unternommen, die Atomenergie auf der Grundlage der Kriterien der Enquete-Kommission „Zukünftige Kernenergie-Politik“ (1980) zu bewerten. Gleichzeitig wollten die Autoren gewissermaßen eine Brücke über unterschiedliche in der Kommission vertretene Standpunkte hinweg bauen. Bei genauerer Prüfung erweisen sich aber die Pfeiler dieser Brücke als keineswegs tragfähig. Die Autoren sehen zwar — im Gegensatz zu dem häufig verständnis- und kritiklosen Pro-Kernenergie-Plädoyer vieler Befürworter — durchaus einige der Gefahren und Risiken der Atomenergie. Sie halten aber bei einer „fairen“ Bewertung der Atomenergie im Lichte der Klimaproblematik den Einsatz der Atomenergie zumindest für eine Übergangszeit für geboten.

Die Argumentation der Autoren läßt sich in 5 Punkten zusammenfassen:

Erstens wird unbegründet vorausgesetzt, daß der Ausstieg aus der Atomenergie zu Lasten der notwendigen CO<sub>2</sub>-Minderung geht; viel mehr spricht jedoch dafür, daß erst durch den Ausstieg die nötige innovative und investive Entwicklungsdynamik für eine „Effizienzrevolution“ (A. Lovins) freigesetzt und die erforderliche energie- und industriepolitische Eingriffstiefe für eine Klimaschutzpolitik ermöglicht wird. Dies wurde bereits im gemeinsamen Zusatzvotum der Kommissionsmitglieder Henicke, Müller u. a. sowie im Zusatzvotum des Kommissionsmitglieds Dr. Knabe mit einer Reihe von Argumenten belegt, die im folgenden noch ergänzt werden.

Zweitens werden die komplexen Abhängigkeits- und Ausbeutungsbeziehungen zwischen der Dritten Welt und den reichen Industrieländern zu vereinfacht mit dem moralischen Gebot der Nichtabwälzung einer national eingegangenen Gefahr auf andere Länder vermengt; darüber hinaus wird für den privaten und häufig nur gegen entschiedenen Widerstand der Bevölkerung durchgesetzten Betrieb von Atomlagen eine Art Kollektivschuld aller konstruiert, die aus der Atomenergie aussteigen wollen. Der Ausstieg aus der Atomenergie schützt aber nicht nur auch Entwicklungsländer vor den Risiken atomarer Verseuchung und den Proliferationsgefahren, sondern ist auch eine Voraussetzung für die forcierte Entwicklung angepaßter, finanzierbarer und risikoarmer Energietechnik auch für die Dritte Welt.

Drittens wird aus dem genannten moralischen Gebot der Vorrang der CO<sub>2</sub>-Emissionsminderung gegenüber dem Ausstieg aus der Atomenergienutzung — also z. B. auch gegenüber der Abwehr einer radioaktiven Verseuchung wie durch Tschernobyl — abgeleitet. Konsequenterweise müßten die Autoren Heinloth und Meyer-Abich dann argumentieren, daß aus der Atomenergie nie mehr ausgestiegen werden darf, weil dies — folgt man ihrer eigenen Argumentation — stets zu höheren CO<sub>2</sub>-Emissionen führen muß.

Viertens wird von den Autoren bei der Prüfung der „Sozialverträglichkeit“ ein System von Leichtwasserreaktoren mit direkter Endlagerung „übergangsweise“ akzeptiert, in dem die Unterschiede zur Brüter- und Wiederaufbereitungstechnologie übersteigert dargestellt werden, obwohl beide Formen der Atomenergienutzung nach ihrem Kriterium von „Umweltverträglichkeit“ ausgeschlossen werden müßten. Denn selbst die Betreiber behaupten nicht, daß die Stromerzeugung in LWR auch im denkbar schlimmsten Fall nur zu Unfällen führen kann, die ein „vertretbares Maß nicht überschreiten“.

Fünftens wird implizit für eine Atomenergienutzung auf Dauer plädiert, falls sich die — bisher nicht beweisbare — Vision von angeblich inhärent sicheren Hochtemperaturreaktoren realisieren ließe.

### 1. Umkehr der Beweislast

Im folgenden kann in der gebotenen Kürze nur auf einige dieser Punkte eingegangen werden:

Um aus dem zusätzlichen Treibhauseffekt ein Argument für die Atomenergie bzw. gegen den Ausstieg ableiten zu können, muß in jedem Fall von der Sinnhaftigkeit und der Notwendigkeit einer Risikoabwägung bzw. einer „Risikostreuung“ (Altbundeskanzler H. Schmidt) ausgegangen werden. Wir bestreiten beides: Weder macht es Sinn, ein lebensbedrohendes Risiko durch ein anderes zu ersetzen noch zwingt der drohende zusätzliche Treibhauseffekt zur Risikostreuung. Im Gegenteil: Die Atomenergie ist quasi die „Speerspitze“ des „harten“, angebotsorientierten Energiepfades, durch den das zukünftige Treibhausrisiko weiter wächst und das aktuelle atomare Risiko nicht abgebaut wird.

Diese These ist mit üblichen Szenarienrechnungen nicht streng quantitativ beweisbar; dies macht sie angreifbar, aber noch nicht falsch. Denn genausowenig ist das Gegenteil mit Szenarienarithmetik zu beweisen: Durch rein rechnerische Addition technischer CO<sub>2</sub>-Reduktionspotentiale mit dem Ausbau der Atomenergie kann die CO<sub>2</sub>-Emissionsminderung fast beliebig hochgerechnet werden (vgl. dazu die Ausbauvariante in diesem Abschnitt).

Die bisherige Praxis — die Folgen der herrschenden Energiepolitik wie auch die Ergebnisse der sie rechtfertigenden „angebotsorientierten“ Szenarien — sprechen allerdings für unsere These und gegen die Rechenexempel von extremen Befürwortern der Atomenergie. Alle für die Bundesrepublik vorliegenden relativ eingriffslosen „Referenzszenarien“ — ob mit konstanter (z. B. ISI/Prognos 1987) oder mit wachsender Atomkapazität (z. B. Prognos 1987) — reichen zur notwendigen Eindämmung der CO<sub>2</sub>-Emissionen bei weitem nicht aus. „Business as usual“ kann die Katastrophe nicht aufhalten.

Die staatliche Energiepolitik und die Unternehmenspolitik der EVU müssen sich also in jedem Fall ändern. Woher nehmen die Autoren Heinloth und Meyer-Abich aber die Gewißheit, daß diese notwendige Wende hin zu einer vorrangigen CO<sub>2</sub>-Minderungspolitik mit Atomenergie wahrscheinlicher ist als ohne Atomenergie?

In ihrem Beitrag ist kein Argument zugunsten einer den Klimaschutz fördernden Rolle der Atomenergie vorgebracht worden. Andererseits gibt es viele Argumente, die dagegen sprechen (vgl. z. B. IIASA 1982; Schefold 1987; Krause/Bach 1989; Lovins 1989; Hennicke 1989/1990). Diese müßten erst einmal widerlegt werden, die Beweislast liegt bei denen, die die Atomenergie mit der „Effizienzrevolution“ (A. Lovins) für vereinbar halten. Wir wissen, daß die Energiewirtschaft „Atomenergie+Sparen“ als ihre neue PR-Botschaft propagiert wird. Aber handelt sie auch danach? Ein wissenschaftlicher Diskurs über diese Frage ist dringend notwendig. In Ergänzung zu den Argumenten, die in den übrigen Voten bereits enthalten sind, bieten wir den Kollegen Heinloth und Meyer-Abich die folgenden zur Widerlegung an:

Erstens: Allein schon die einseitige Bindung von volkswirtschaftlichem Kapital, von Forschungskapazitäten, wissenschaftlichem Know-how sowie von weltanschaulichen und beruflichen Karrieren an die Atomenergie machen einen energiepolitischen Paradigmenwechsel hin zu einer „sanften“ vorrangigen Energiesparpolitik äußerst unwahrscheinlich. Nach wie vor geht z. B. der Löwenanteil der öffentlichen Forschungsgelder (etwa 2/3) an die Atomenergie. Von 1955 — 1988 flossen 36,9 Mrd. DM (=84 %) der öffentlichen Fördermittel im Bereich der Energieforschung in die Kernspaltung und -fusion, 2,3 Mrd. DM (=5,2 %) in die erneuerbaren Energiequellen und nur 0,8 Mrd. DM (=1,9 %) in die rationelle Energieanwendung (Nitsch/Luther 1990). Es ist schwer vorstellbar, wie für die seit drei Jahrzehnten einseitig ausgerichtete öffentliche Forschungspolitik sowie für die sie vollziehenden Ministerialbürokratien und Großforschungseinrichtungen ohne eine grundsätzliche Richtungsentscheidung gegen die Atomenergie die Prioritäten umgekehrt werden könnten.

Zweitens: Insbesondere der erforderliche Übergang zur Solarenergiewirtschaft wird nur dann rasch genug erfolgen und eine erfolgreiche Entwicklungsdynamik entfalten, wenn gewährleistet werden kann, daß er von einer sehr großen und „lokalen“ Gruppe von Investoren getragen wird: „Zunächst würden die als ‚lokal‘ bezeichneten Potentiale erneuerbarer Energiequellen erschlossen, da sie sich im wesentlichen in die heutige Siedlungsstruktur und die vorgegebenen Energieversorgungsstrukturen einfügen, sie nutzen und jeweils passend ‚vor Ort‘ die Nachfrage nach anderen Energieträgern reduzieren. Erst wenn sich diese Technologien in einem gewissen Ausmaß erfolgreich etabliert haben, wird man auch die großflächige Nutzung erneuerbarer Energiequellen in Betracht ziehen. Diese ‚lokale‘ Nutzung würde der jetzigen Energieversorgungsstruktur bedeutende dezentrale Elemente hinzufügen, und die Rolle der Kommunen bei der Gestaltung der zukünftigen Energieversorgung beträchtlich aufwerten“ (Nitsch/Luther 1990). So überzeugend dieses von Nitsch/Luther vortragene systemtechnische Plädoyer für einen vorrangig lokalen Übergang zur Sonnenenergie-Wirtschaft ist, sucht man doch vergeblich nach einer energiewirtschaftlichen Begründung dafür, daß alles dies sich problemlos „in die vorgegebenen Energieversorgungsstrukturen einfügen“ könnte. Wie direkt diese Frage mit einer Richtungsentscheidung gegen die

Atomenergie verknüpft ist, sei am Beispiel der Photovoltaik gezeigt: Haupthemmnis für die umfassende Markteinführung von PV-Anlagen in der Bundesrepublik sind die hohen Stromgestehungskosten von etwa 1,60–2,20 DM/kWh. Nach Studien der EK könnten die Stromgestehungskosten bis zum Jahr 2005 auf 23–30 Pf/kWh sinken, wenn es gelingen würde, die Produktionskapazitäten auf 1000–3000 MW (!) auszubauen. Die gegenwärtige Produktionskapazität in der Bundesrepublik beträgt etwa 6 MW und die Produktion etwa 1–2 MW. Es kann wohl ausgeschlossen werden, daß Siemens/KWU als größter Hersteller sowohl von Atom- als auch von PV-Anlagen einen derartigen riskanten Kapazitätsausbau für PV-Anlagen beschließen wird, wenn die politischen Signale aus Bonn nicht eindeutig gegen einen Verbleib im Atomgeschäft und gegen die zur Zeit noch erhoffte „Renaissance“ der Atomenergie gestellt werden. Auch die Hersteller und potentiellen Betreiber von Windkraftanlagen und von dezentralen Heizkraftwerken sowie von Stromspartechniken brauchen dringend eine derartige unzweideutige Weichenstellung für ihre Kapazitätsausbauplanung.

Schweden kann als Beleg dafür stehen, daß erst der Ausstiegsbeschluß (obwohl immer wieder in Frage gestellt!) eine Welle von Innovation und Investitionen in die Alternativen auslöst: Im „Bioenergy Program“ werden z. B. 170 Mio. Dollar u. a. für die Biomassevergasung mit hocheffizienten Gas-Turbinen in Heizkraftwerken investiert. Im „Commercial Electricity Conservation Project“ investiert Vattenfall, das größte schwedische EVU, 170 Mio. Dollar zur Steigerung der Energieeffizienz bei seinen Kunden (Johansson 1990).

Drittens: Die 7 Verbund-Unternehmen, die die in der Bundesrepublik installierte AKW-Kapazität (rd. 24 GW; investiertes Kapital im Wert von derzeit fast 60 Mrd. DM) hauptsächlich besitzen und betreiben, würden sich betriebswirtschaftlich irrational verhalten, wenn sie – ohne Not (d. h. ohne die politische Vorgabe eines Atomausstiegs) – auf deren maximale Verwertung freiwillig verzichten würden (Minister Jansen ist letztlich deshalb auch aus dem Aufsichtsrat der HEW herausgeklagt worden). Wer von den Verbund-EVU erwartet, daß sie selbst oder durch Unterstützung anderer Investoren forciert Stromsparen sowie mehr KWK und Regenerative zwecks CO<sub>2</sub>-Minderung in den schon jetzt übervollen Kraftwerkspark hineinzuwängen sollen, fordert sie unter den derzeitigen Rahmenbedingungen auf, gegen ihr kurzfristiges Unternehmensinteresse und gegen ihr einzelwirtschaftlich rationales Rentabilitätskalkül zu handeln.

Sicherlich gibt es CO<sub>2</sub>-Reduktionsbereiche, die auch relativ unabhängig von der Atomstromkapazität mehr oder weniger ausgeschöpft werden können, z. B. im Verkehr und im Bereich des Energieeinspargesetzes von 1976 (z. B. Verschärfung der Wärmeschutzverordnung). Dennoch: Rund 40 % der CO<sub>2</sub>-Emissionen in der Bundesrepublik stammen direkt (bei Erdgas) oder indirekt (bei der Elektrizitäts- oder Fernwärmeerzeugung aus fossilen Energieträgern) aus dem Verkauf leitungsgebundener Energieträger; ein weiterer Anteil von rd. 20 % CO<sub>2</sub>-Emissionen, der insbesondere aus der Heizwärme- und Warmwassererzeugung mit Heizöl in den Sektoren Haushalte, Kleinverbrauch

und Industrie resultiert, kann auch durch die Unternehmenspolitik von EVU indirekt mitbestimmt werden (z. B. durch Nah- und Fernwärmeangebote oder Einsparpolitik). Daher bedeutet die Umsetzung der erforderlichen CO<sub>2</sub>-Reduktionspolitik immer auch einen radikalen Wandel der Unternehmensziele von EVU: Aus dem traditionellen Energieabsatzmaximierer muß ein Energiedienstleistungsunternehmen (EDU) entstehen.

Daher bleiben wir bei unserer These: Ein wesentlicher Anteil der CO<sub>2</sub>-Emissionsminderung kann deshalb nicht realisiert werden, weil kein ökonomischer Anreiz dafür besteht, daß im massenhaften Umfang und von vielen Investoren über einen autonomen Marktrend hinaus volkswirtschaftlich kosteneffektive CO<sub>2</sub>-Reduktionspotentiale in ein bestehendes Groß-Kraftwerkssystem mit einem hohen AKW-Anteil integriert werden.

Viertens: Wenn es schon keinen ökonomischen Anreiz zum Klimaschutz für die großtechnischen Energieanbieter gibt, warum sollten sie dann überhaupt ihre Politik ändern? Wäre es nicht aus ihrer Sicht viel klüger, einfach abzuwarten, um – gestützt auf mehr Betroffenheit – sich als die atomaren Retter in der Not anzubieten? Sicher wäre dies ein gefährliches Kalkül mit der Katastrophe. Aber können die Autoren Heinloth und Meyer-Abich dies wirklich ausschließen?

Einige setzen offenbar so bewußt auf Zeit, daß die ersten katastrophalen Auswirkungen des Treibhauseffekts konkret erfahrbar werden. Wer dies sogar noch öffentlich ankündigt, denkt wohl kaum daran, ab sofort eine Politik der forcierten CO<sub>2</sub>-Reduktion zu unterstützen, um diese Auswirkungen einzudämmen. Als Resümee eines Kernenergie-Expertentreffens in Japan berichtet ein Vertreter der VDEW: „Es bestand Übereinstimmung, daß das CO<sub>2</sub>-Argument nicht vorzeitig verschlissen werden sollte. Erst wenn die Öffentlichkeit nach CO<sub>2</sub>-armer Energieerzeugung ruft, sollte von den EVU darauf hingewiesen werden, daß neben Energiesparen auch Kernenergie einen gewichtigen Teil, besonders in den Industrieländern, beizutragen vermag.“ Erst dann, so muß dieser Autor wohl interpretiert werden, wenn die Klimaveränderung konkret erfahrbar und damit eine Umkehr kaum noch möglich ist, sei die Öffentlichkeit bereit, „die Kernenergie auch zu tolerieren. Zu dieser Einsicht darf die Bevölkerung aber nicht gezwungen werden, da sie sie sonst bei den geringsten Vorkommnissen wieder ändern wird.“ (Kienle, 1989)

## 2. Das Prinzip Hoffnung

Auf die Risiken der Atomenergie kann hier nicht eingegangen werden (vgl. hierzu Abschnitt E, 4. Kapitel, Nr. 5.2: „Kritische Aspekte bei der Abschätzung der Potentiale der Kernenergie zur Reduzierung der klimarelevanten Spurengasemissionen“ und das Zusatzvotum von Müller u. a. zu Nr. 5: „Zusammenfassung und Bewertung der Ergebnisse des Studienkomplexes ‚Nutzung der Kernenergie‘), nur auf das „Prinzip Hoffnung“, das die Autoren in ihrem Plädoyer für neue Entwicklungsziele bei der Weiterentwicklung der Atomenergie beflügelt.

„Katastrophale Unfälle dürfen auch mit noch so geringer Wahrscheinlichkeit nicht riskiert werden“. Diesem Petitum der Autoren Heinloth und Meyer-Abich ist vorbehaltlos zuzustimmen. Aber bei welchen der heute technisch machbaren und zukünftig denkbaren Reaktortypen kann ein katastrophaler Unfall definitiv ausgeschlossen werden?

Etwa für die Weiterentwicklung des LWR, auf den dieses Petitum zielt? Dies behaupten nicht einmal die Betreiber. Wie kann es aber dann „in unserer Verantwortung“ liegen, „wissenschaftlich und technisch (!) zur ausreichend sicheren (!) Nutzung der Atomkernenergie – wo immer in der Welt – beizutragen“. Sind „unsere“ LWR etwa „ausreichend sicher“ und soll durch deren nationaler Weiterbetrieb bzw. deren Weiterentwicklung die Voraussetzung für den geforderten internationalen technischen Beitrag erhalten werden? Dann würde jedes „wo immer in der Welt“ noch betriebene Atomkraftwerk die Begründung dafür liefern können, in der Bundesrepublik nicht aus der Atomenergie aussteigen zu dürfen.

Oder ist vielleicht der HTR gemeint, der bisher nur als Demonstrationsanlage mit offenbar zahlreichen technischen Problemen existiert und für den nicht einmal eine vergleichbare Risikoanalyse wie für den LWR vorliegt? Woher wissen die Autoren Heinloth und Meyer-Abich dies gar für einen reinen Papier-Reaktor, den geplanten HTR-Modul: „Der HTR-Modul nutzt die inhärente Sicherheitseigenschaften des HTR, um die Strahlenexposition in der Umgebung auch bei auslegungsüberschreitenden (!) Ereignisketten im Bereich der durch die Strahlenschutzverordnung gezogenen Grenzen für Auslegungsstörfälle zu halten.“ Dies kann doch nur bedeuten: Einen katastrophalen Unfall halten die Kollegen beim HTR-Modul unter allen denkbaren und zuvor nicht denkbaren Umständen für ausgeschlossen. Mag sein, daß der HTR inhärent risikoärmer ist, als der LWR, aber ist er deshalb schon „inhärent sicher“? Ist dies nicht genauso blinde Physikgläubigkeit, wie der Glauben des Ingenieurs an die angeblich „fehlerverzeihende Technik“ (Dr. Barthelt/KWU)?

In Abschnitt E, 4. Kapitel, Nr. 5.2: „Kritische Aspekte bei der Abschätzung der Potentiale der Kernenergie zur Reduzierung der klimarelevanten Spurengasemissionen“ wurde zum HTR und zu den hier denkbaren „Ereignisketten“ mit möglichen katastrophalen Ausmaßen im Detail Stellung genommen.

### 3. Gesellschaftliche Kosten

Unter dieser Überschrift schreiben die Autoren Heinloth und Meyer-Abich: „Welche Kosten mit dem Betrieb von Atomkraftwerken in Zukunft verbunden gewesen sein werden (!), ist sowohl hinsichtlich der Entsorgungskosten als auch hinsichtlich der gesellschaftlichen Kosten heute nicht bekannt“; eine zwar kühne sprachliche Formulierung, aber zutreffend. Für Ökonomen ist das Problem einfach: Da Kosten für die Atommüll-„Entsorgung“ noch in vielen hundert Jahren anfallen, sind sie – abdiskontiert und heute – gering. Je länger der Müll bewacht und „absolut sicher eingeschlossen“ werden muß, desto billiger wird

er für die EVU von heute. Eine aus der Sicht zukünftiger Generationen absurde Logik.

Leider fahren auch die Kollegen Heinloth und Meyer-Abich an der zitierten Stelle fort: „Beschränkt man sich auf die in der Vergangenheit bereits angefallenen, die in der Gegenwart anfallenden und die für die Zukunft bereits sicher vorhersehbaren Kosten, so ergeben sich für den Grundlastbetrieb Vorteile gegenüber der heimischen Steinkohle und etwa ein Gleichstand gegenüber der Braunkohleverstromung“.

Erstens: Ist diese „Beschränkung“ überhaupt logisch zulässig, wenn zuvor zurecht betont wurde, daß die Entsorgungskosten nicht bekannt sind? Oder wollen sich die Kollegen die zitierte absurde Logik der Ökonomen hier zu eigen machen?

Zweitens: Der betriebswirtschaftliche Systemvergleich zwischen großen Steinkohle-Kondensationskraftwerken und LWR wird zwar von Betreibern immer wieder zitiert; er ist aber wegen der unvollständigen Systemabgrenzung kein Beleg für die relative Kosteneffektivität von Atomstrom. Da LWR in der Bundesrepublik nur zur Stromerzeugung eingesetzt werden, bleibt die Abwärme ungenutzt, weshalb im Bereich der Niedertemperaturwärme mehr Öl und Gas verbrannt werden muß, als technisch notwendig ist. Werden hierzu Gas- oder Kohle-KWK-Anlagen eingesetzt, so könnten – bei anlegbaren Preisen für die ausgekoppelte Nah- und Fernwärme – die Stromerzeugungskosten deutlich geringer sein als die aus LWR; so im neuen Kohle-HKW-Römerbrücke in Saarbrücken (10 – 13 Pf/kWh) und nachgewiesen in vielen Studien (z. B. Viefhues in Hennicke et al 1985; Traube/Zeine 1987; Dr. Schmitt/PREAG vor dem Hessischen Landtag, 1986).

Drittens: Haben die Autoren die Kosten von Tschernobyl vergessen? Auch sie sind „bereits angefallen“, und was für die Zukunft jetzt allmählich „vorhersehbar“ ist, übersteigt wohl die Kosten aller bisherigen nicht militärischen Katastrophen. Nach Angaben aus der sowjetischen Presse entstehen bis zum Jahr 2000 Nutzungsausfälle in der Landwirtschaft in Höhe von 600–900 Mrd. DM, bisher wurde zur Beseitigung der Schäden 90 Mrd. DM aufgewandt, die Kosten der Dekontamination des schwer verseuchten Ackerlandes würde mindestens 500 Mrd. DM kosten, allein ein Hilfsplan für die Ukraine und für Weißrußland wird 49 Mrd. DM verschlingen. Und was „kostet“ das millionenfache Elend und der Tod nach Tschernobyl?

Viertens: Was „kostet“ ein möglicher weiterer Super-Gau? Wenn er im dichtbesiedelten Europa oder in Japan stattfindet, wäre dies wohl das endgültige Ende der Atomenergie oder die Öko-Diktatur. Beides würde dann „teuer“ werden. Heute ist ein kurzfristiger und kostengünstiger, weil planmäßiger Rückzug aus der Atomenergie in allen Ländern (außer vielleicht in Frankreich) noch möglich (vgl. zu den Möglichkeiten eines Sofortausstiegs in der Bundesrepublik das im Auftrag der GRÜNEN erstellte CO<sub>2</sub>-optimierte Szenario des ÖKO-Instituts 1990 sowie das Zusatzvotum von Dr. Knabe).

### 4. Der Atommüll

Als drittes Entwicklungsziel nennen die Autoren Heinloth und Meyer-Abich: „Entlastung zukünftiger

Generationen von den Altlasten atomtechnischer Anlagen, die von uns in Betrieb genommen worden sind, ohne eine klare Vorstellung davon zu haben, wie der Atom Müll entsorgt werden kann“. Dem könnte zugestimmt werden, wenn dieses Entwicklungsziel nicht paradoxerweise formuliert würde, „um die Gefahren der LWR-Technik zu vermindern“. Sind denn irgendwelche Weiterentwicklungen der LWR-Technik oder irgendeiner anderen Atomtechnik denkbar, die „zur Entlastung zukünftiger Generationen von den Altlasten atomtechnischer Anlagen“ – also doch wohl unter anderer Entlastung vom Atom Müll – beitragen? „Entlastung“ im Sinne von quantitativer und qualitativer Begrenzung des Atom Mülls ist nur durch Ausstieg möglich, jeder Tag Weiterbetrieb belastet zukünftige Generationen mehr. Tabelle 1 veranschaulicht: Je länger an der Atomenergienutzung festgehalten wird, desto mehr verschärft sich das ungelöste Entsorgungsproblem: Quantität schlägt hier um in Qualität.

sten atomtechnischer Anlagen“ – also doch wohl unter anderer Entlastung vom Atom Müll – beitragen? „Entlastung“ im Sinne von quantitativer und qualitativer Begrenzung des Atom Mülls ist nur durch Ausstieg möglich, jeder Tag Weiterbetrieb belastet zukünftige Generationen mehr. Tabelle 1 veranschaulicht: Je länger an der Atomenergienutzung festgehalten wird, desto mehr verschärft sich das ungelöste Entsorgungsproblem: Quantität schlägt hier um in Qualität.

Tabelle 1

**Atom Müllbilanz**

Szenarioannahme	Kapazität = const. (23,6 GW)		Auslaufen bis 2005	
	2005	2050	2005	2050
Jahr .....				
Hochaktive Abfälle (in Tonnen) .....	16 916	47 023	10 962	10 962
Schwachaktive (in qm)				
– ohne WAA .....	211 223	574 663	136 883	136 883
– mit WAA .....	359 682	978 569	233 092	233 092
Mittelaktive (in qm)				
– ohne WAA .....	4 224	11 493	2 738	2 738
– mit WAA .....	44 055	119 858	28 550	28 550
Uranerzhalden (in 1 000 Tonnen) .....	59 212	161 094	38 372	38 372

Quelle: ÖKO-Institut 1990

**5. Der Aus- und Umstieg in eine neue Entwicklungsdynamik**

Als Quintessenz der Überlegungen der Kollegen Heinloth und Meyer-Abich „folgt die Priorität der CO<sub>2</sub>-Emissionsminderung gegenüber dem Ausstieg aus der Atomenergienutzung“. In der Logik ihrer Argumentation kann dies nur so interpretiert werden: Solange zuvor nicht alles Erforderliche zur Verminderung der CO<sub>2</sub>-Emissionen getan worden ist, darf – aus moralischen Gründen – der auch von den Autoren noch für möglich gehaltene Verzicht auf die Atomenergie nicht vollzogen werden.

Diese apodiktische Festlegung der Prioritäten ist erstens deshalb problematisch, weil sie zur Ausgrenzung und Denunziation der politischen Bewegung mit dem Ziel eines kurzfristigen Ausstieg mißbraucht werden kann.

Zweitens ist sie energiepolitisch gefährlich, weil sie der Atomindustrie – unter Verweis auf die noch unzureichende CO<sub>2</sub>-Emissionsminderung – die willkommene Begründung für ihre Forderung nach Besitzstandswahrung liefern könnte. Die Energiepolitik würde dadurch erpreßbar. Die Betreiber von Atomanlagen könnten sich direkt aufgefordert fühlen, eine wirksame Klimastabilisierungspolitik noch mehr zu blockieren, als es ohnehin geschieht.

Vor allem beruht drittens das gesamte Argument auf der unbegründet vorausgesetzten Prämisse, daß insbesondere ein kurzfristiger Ausstieg eine Klimastabilisierungspolitik erschwert. Die folgenden Thesen – in Stichworten – sprechen dafür, daß genau das Gegenteil gilt:

Erstens: Je schneller der Ausstieg, desto rascher entsteht ein rentabler Markt und finden sich die notwendigen Investoren für die umfassende Markteinführung der CO<sub>2</sub>-Reduktionspotentiale (Effizienz, KWK, Regenerative)

- der derzeit bereits extrem hohe Cash Flow der AKW-Betreiber kann dann für ein Investitionsprogramm zur Klimastabilisierung nutzbar gemacht werden (statt kontraproduktiver Diversifizierung ins Öl- und Müllverbrennungsgeschäft und monopolistische Aufteilung der DDR),
- der ökonomische Spielraum für Newcomer (dezentrale KWK, Regenerative, Energieagenturen) wächst sprunghaft und die betriebswirtschaftlichen Motive für die Behinderung des Marktzutritts (Einspeisebedingungen; Lockvogel-Lieferangebote; attraktivere Konzessionsabgaben) durch überregionale EVU werden abgeschwächt,
- der notwendige Strukturwandel hin zu einem dezentraleren, rekommunalisierten, klima- und um-

weltverträglicheren Energiedienstleistungssystem wird begünstigt.

Zweitens: Ein rascher Ausstieg aus der Atomenergie verursacht zwar eine kurzfristige CO<sub>2</sub>-Spitze, schafft damit aber gleichzeitig die notwendige Entwicklungsdynamik für eine in der Summe größere CO<sub>2</sub>-Reduktion

- der kurzfristige Anstieg der CO<sub>2</sub>-Emissionen liegt auch nach einem Sofortausstieg – bei einem ökologisch optimierten Kraftwerkseinsatz (insbesondere ein Mehreinsatz von Erdgas; vgl. Voss/Masuhr 1990) – maximal bei + 12 %,
- entscheidend ist jedoch die durch den Ausstieg ermöglichte langfristige und vor allem die in den entscheidenden Jahren bis 2005 vermiedene höhere CO<sub>2</sub>-Emissionssumme durch den forcierten Einsatz von ökonomisch attraktiven CO<sub>2</sub>-Reduktionspotentialen (vgl. ÖKO-Institut 1990 sowie das Zusatzvotum von Dr. Knabe),
- die rechnerische Maximierung der CO<sub>2</sub>-Reduktionspotentiale in Strategien mit Atomenergie (je mehr Atomenergie, desto höher die Potentiale!) stehen dagegen nur auf dem Papier.

Drittens: Je eindeutiger die energiepolitische Richtungsentscheidung gegen die Atomenergie und für die Alternativen,

- desto größer der betriebswirtschaftliche Anreiz, die notwendigen Produktionskapazitäten für den wirtschaftlichen Einsatz der Solarenergie zu schaffen (z. B. Siemens: PV oder Atomtechnologie),
- desto unmißverständlicher die Signale an Hersteller und Investoren zur rascheren Markteinführung der Alternativen,
- desto konsequenter auch die Wende in den staatlichen Forschungsprioritäten und in der -Ingenieurausbildung/fortbildung.

Viertens: Je eher aus der Atomenergie ausgestiegen wird, desto früher steigen die Chancen für einen industriepolitischen Umbau und für einen technologischen Sprung in die Sonnenenergie-Wirtschaft.

- Die Innovationsanstöße und industriepolitischen spin-off-Effekte eines Atomausstiegs sind nach Prognos 1987 positiv (vgl. Zusatzvotum Henricke, Müller u. a.).
- Die Technologiebasis eines energieeffizienten und rekommunalisierten bzw. dezentralisierten Energiesystems in der Bundesrepublik Deutschland wäre nicht nur generell exportfähiger, sondern ist auch an die Entwicklungsbedingungen in der Dritten Welt weit anpassungsfähiger als ein großtechnisches Verbundsystem mit Atomenergie.
- Dies gilt insbesondere auch für die großtechnische Herstellung, Kostendegression und Markteinführung von PV- und Windkraftanlagen und deren dezentralen Einsatz in der Dritten Welt.

Fünftens: Je länger und je intensiver auf Atomenergie gesetzt wird, desto unwahrscheinlicher wird ein Programm der umwelt- und klimaverträglicheren Kohlenutzung (mit kommunalen und industriellen Heiz-

kraftwerken z. B. auf Basis von Wirbelschicht und/oder GuD-HKW).

- Eine Strategie der atomaren Besitzstandswahrung und vor allem der Atomausbau reduziert die Kohle-Verstromungsmengen unter Mikat-Mehrheit (vgl. das Zusatzvotum Henricke, Müller u. a.).
- Ein sozialverträglicher und allmählicher Umbau der Kohlereviere wird unmöglich gemacht, und daher werden unnötige volkswirtschaftliche Kosten und Arbeitsplatzverluste verursacht.
- Der Zugriff auf das in der Dritten Welt und in Osteuropa dringend gebrauchte Erdgas wird verschärft; die Option „Ausbau der Nah- und Fernwärme sowie der industriellen Prozeßwärme“ auf Basis von KWK und (zum Teil) mit „einheimischer“ Kohle wird vollends unmöglich gemacht.
- In der BRD/DDR wird ein „technologischer Fadenriß“ auf einem für den Technologietransfer z. B. nach China und Indien entscheidenden Gebiet (hocheffiziente Kohle-HKW) eintreten; maximal emissionsmindernde HKW-Technik zur Kohlenutzung bildet übrigens auch für die größten und für den weltweiten Klimaschutz entscheidenden Schlüsseländer in der Welt (die USA und die Sowjetunion) eine wahrscheinlich unverzichtbare Brücke zur Sonnenenergie-Wirtschaft.

## 6. Ein Angebot

Die Besorgnis der Kollegen Heinloth und Meyer-Abich vor den möglichen katastrophalen Auswirkungen des zusätzlichen Treibhauseffekts insbesondere für die Dritte Welt teilen wir. Aber dies ist für uns kein Grund, die Abwehr eines neuen Tschernobyl und der Risiken der Atomenergie durch den Ausstieg als quasi zweitrangig zu bewerten. Ein Konsens wäre möglich, wenn sich die Schlußphase ihres Beitrags wie folgt umformulieren ließe: „Aus dem Kriterium, daß wir uns einer national eingegangenen Gefahr nicht dadurch entziehen dürfen, daß wir andere Länder verstärkt einer anderen Gefahr aussetzen, folgt der Imperativ einer globalen möglichst risikoarmen Energiestrategie. Wegen der drohenden Klimakatastrophe darf daher der notwendige und mögliche Ausstieg aus der Atomenergie nicht zu Lasten der notwendigen CO<sub>2</sub>-Emissionsminderung gehen.“

Prof. Dr. Meyer-Abich hat gegenüber der hier vertretenen Gegenposition einmal eingewandt, sie beruhe auf „Wunschdenken“. In diesem Sinne hat er recht: Auch Wissenschaftler sollten darüber nachdenken, wie sie sich die Zukunft wünschen. Wir finden bislang kein überzeugendes Argument dafür, warum eine risikoarme Energiestrategie ohne Atomenergie und ohne katastrophale Klimaänderungen nicht möglich sein könnte; über die Realisierung dieses Wunsches sollten wir mehr gemeinsam nachdenken.

(Ende der Zusatzvoten)



## 6. Emissionsminderung durch neue Sekundärenergieträger und -nutzungssysteme

### 6.1 Energiespeicher<sup>1)</sup>

Energiespeicher können zur CO<sub>2</sub>-Minderung dadurch beitragen, daß sie den Anteil CO<sub>2</sub>-freier Energieträger an der Deckung des Energiebedarfs erhöhen (zum Beispiel Erhöhung des solaren Anteils an der Deckung des Warmwasserbedarfs über einen Wärmespeicher) oder dadurch, daß sie CO<sub>2</sub>-freien Energieträgern neue Einsatzgebiete erschließen, zum Beispiel dem Wasserstoff im Verkehr.

Die Speicherung von Wärme ist in sensibler oder latenter Form sowie in thermochemischen Energiespeichern möglich. Niedertemperaturwärmespeicher mit Temperaturen unter 100 °C dienen in Solarkollektor- und Kraft-Wärme-Kopplungsanlagen zur kurzzeitigen und saisonalen Speicherung. Wasserspeicher zur Kurzzeit-Wärmespeicherung (das heißt bis etwa 24 Uhr) sind technisch fertig entwickelt. Ihre spezifischen Kosten liegen zwischen 550 DM/m<sup>3</sup> (150 m<sup>3</sup>-druckloser Stahlbehälter) und 3750 DM/m<sup>3</sup> Speichervolumen (500 l Brauchwasserspeicher).

Niedertemperaturlangzeitspeicher sind für die Nutzung der Sonnenenergie von großer Bedeutung. Der solare Deckungsgrad von Nahwärmesystemen kann mit einem Langzeitwärmespeicher von 10 – 15 Prozent auf 60 – 80 Prozent erhöht werden. Niedertemperaturlangzeitspeicher befinden sich jedoch noch in der Entwicklung. Die in Schweden verwendete Technik von bergmännisch erstellten Kavernen in Granit (zum Beispiel Lyckebo-Speicher mit 100 000 m<sup>3</sup>), bei der der Granit als Wärmedämmung fungiert, sind aus geologischen Gründen in der Bundesrepublik Deutschland nicht anwendbar. Hier werden Erdbekenspeicher untersucht und zu Testzwecken betrieben. Angaben zum CO<sub>2</sub>-Minderungspotential werden nicht gemacht. Mitteltemperaturspeicher von etwa 100 °C bis etwa 500 °C Speichertemperatur finden in der bisherigen Energieversorgung wenig Verwendung; gelegentlich werden sie zur kurzfristigen Abwärmenutzung bei industriellen Prozessen eingesetzt. Da Dampf bei Prozeßwärmeanlagen der vorherrschende Wärmeträger ist, handelt es sich meist um Dampfspeicher. Das technische Potential der mit Wärmespeicherung in der Abwärmenutzung erreichbaren Energieeinsparung ist noch weitgehend ungenutzt.

Solarthermische Kraftwerke benötigen einen Wärmespeicher, um ein von den Änderungen der Sonneneinstrahlung unabhängiges Energieangebot zur Verfügung zu stellen. Es sind bisher nur Kurzzeitspeicher (das heißt für mehrere Stunden) realisiert worden. Für Temperaturen bis 300 °C ist Mineralöl das kostengünstigste Speichermedium, bis etwa 400 °C können noch synthetische Öle und Silikonöle verwendet werden.

Latentwärmespeicher, die den theoretischen Vorteil hoher Speicherdichte und konstanter Arbeitstemperatur aufweisen, sind in der Entwicklung. Ein praktischer Einsatz ist noch nicht abzusehen. Hochtemperaturspeicher, etwa 500 °C bis etwa 1300 °C, sind aus keramischem Material ausgeführt, beispielsweise Magnesiumoxid (MgO), Aluminiumoxid (Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>), Siliziumoxid (SiO<sub>2</sub>). Als „Winderhitzer“ in der Stahlindustrie sind sie Stand der Technik. Forschungsarbeiten verfolgen die Entwicklung kleinerer Speicher mit infolge höherer Speicherdichte durch Verwendung von Keramik-Salz-Gemischen.

Wärme kann auch dadurch gespeichert werden, daß sie zur Durchführung einer chemischen Reaktion eingesetzt wird: Die Reaktionsprodukte werden gespeichert, in der Rückreaktion wird die Wärme wieder abgegeben. Die Vorteile dieser thermochemischen Speicher sind höhere Energiedichten gegenüber Wärmespeichern auf Wasser- oder Ölbasis und kein Energieverlust während des Lagerns.

Praktisch untersucht werden Metallhydridspeicher, bei denen sich durch Wärmezufuhr das Medium in Metall und Wasserstoff zerlegt und bei der Umkehrreaktion wieder Wärme abgibt. Weitere Speichermedien sind Zeolithe und Aluminium. Zeolithe sind Alumo-Silikate, die eine kristalline Struktur mit Mikroporen aufweisen. Zeolithe können deshalb Wasser aufnehmen, welches durch Wärmezufuhr wieder ausgetrieben werden kann. Mit dem System AL/O<sub>2</sub> kann ein wärmeabgebender Energiespeicher erstellt werden. Da für den Ladevorgang, der elektrolytischen Reduktion von Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> zu Al, elektrische Energie verbraucht wird, handelt es sich um einen gemischt elektrisch/thermischen Speicher. Thermochemische Speicher sind komplex und die Speichermaterialkosten sind teilweise hoch. Daher gibt es bisher nur wenige Prototypanlagen und noch keine kommerzielle Anwendung.

Ein CO<sub>2</sub>-Minderungspotential für Wärmespeicher kann nur in Abhängigkeit von der Einsatzart und der jeweiligen Zahl der Systeme, in die sie integriert werden, ermittelt werden. Das gesamte Potential der CO<sub>2</sub>-Minderung durch den Einsatz von Wärmespeichern läßt sich gegenwärtig nicht quantifizieren. Möglich sind nur exemplarische Angaben. Durch die Vergrößerung des Wärmespeichers in einem solar unterstützten Nahwärmenetz ließe sich der solare Deckungsanteil von 23 Prozent bei kleinen Speichern durchaus verdoppeln.

Das über Speicher für industrielle Abwärme erreichbare CO<sub>2</sub>-Minderungspotential wird auf 1,1 Millionen Tonnen CO<sub>2</sub>/a geschätzt. Dabei wird die Annahme gemacht, daß die in Prozeßwärmeanlagen anfallende Abwärme bei der Glaserzeugung, bei der Zellstoff-, Papier- und Pappherstellung, bei der Zementherstellung und in der chemischen Industrie in ein Fernwärmenetz eingekoppelt wird und fossile Brennstoffe ersetzt.

Als Speicher für elektrische Energie kommen

- elektrochemische Speicher (Batterien),
- Pumpspeicherkraftwerke,
- Schwungradspeicher,

<sup>1)</sup> Dieser Teil wurde im Rahmen der zusammenführenden Energiestudie (vgl. Kapitel 6) von Prof. Voß federführend bearbeitet.

- Druckluftspeicher und
- supraleitende Magnetfeldspeicher in Betracht.

Die möglichen Einsatzbereiche von Speichern elektrischer Energie sind

- die Sekundenreserve in Verbundnetzen (Frequenz/Wirkleistungsregelung),
- in Kleinversorgungssystemen der Ausgleich von tageszeitlichen Schwankungen von Erzeugung und Verbrauch,
- der Ausgleich tageszeitlicher Schwankungen von Erzeugung und Verbrauch im Verbundnetz,
- die Energieversorgung von Fahrzeugen.

Stand der Technik bei elektrochemischen Speichern sind die Blei-, Nickel-Cadmium (Ni/Cd)- und Nickel-Eisen (Ni/Fe)-Batterien. Trotzdem besteht im Detail noch Entwicklungsbedarf im Sinne von Systemoptimierungen. Dies gilt insbesondere für den Einsatz in Photovoltaikanlagen mit relativ niedrigen Lade- und Entladeleistungen. Bei der Natrium-Schwefel (Na/S)-Batterie steht die Entwicklung eines Modells, das eine serienreife Lebensdauer aufweist, im Vordergrund der Arbeiten.

Pumpspeicherkraftwerke sind Stand der Technik. Allein in der Bundesrepublik Deutschland (ohne ehemalige DDR) sind Pumpspeicherkraftwerke mit einer gesamten Bruttoengpaßleistung von 2,55 GW<sub>el</sub> und einem Speicherinhalt von 15,2 GWh installiert.

Schwungradspeicher speichern Energie in Form von kinetischer Energie. Der speicherbare Energiebetrag ist proportional dem Massenträgheitsmoment und dem Quadrat der Geschwindigkeit. Daraus resultiert, daß der spezifischen Speicherkapazität mechanische Grenzen gesetzt sind. Schwungradspeicher haben sich bis heute keinen wesentlichen Einsatz in der Energiewirtschaft erschließen können. Die Anwendungen sind nicht über das Versuchsstadium, hier insbesondere als Kurzzeitspeicher bei Fusionsanlagen, hinausgekommen. Ein Entwicklungspotential zu höheren Energiedichten hin besteht noch durch den Einsatz glasfaserverstärkter Werkstoffe.

Bisher existiert weltweit nur ein einzige Druckluftspeicherkraftwerk, das 1977 in Betrieb genommene Kraftwerk Huntorf in Niedersachsen.

Im magnetischen Feld supraleitender Spulen läßt sich magnetische Energie im einem so hohen Maße speichern, daß eine technische Nutzung solcher Spulen als Energiespeicher möglich wird. Wegen des hohen Hilfsenergieverbrauchs ist ein Einsatz von supraleitenden Magnetfeldspeichern als Wochen- oder gar Jahresspeicher gegenwärtig nicht denkbar. Kleinere Speicher (kWh-MWh Bereich) könnten zur Frequenz-Wirkleistungs-Regelung, größere Anlagen (GWh Bereich) als Tagesspeicher eingesetzt werden. Zum Auffangen der enormen elektromagnetischen Kräfte sind große Mengen an Stützmaterial (80 kg/kWh) erforderlich. Bei unterirdischer Bauweise unter Ausnützung natürlicher Massen ist noch mit einem Stützmaterialbedarf von 1 kg/kWh zu rechnen. Der Flächenbedarf einer solchen Anlage beträgt – je nach zulässiger Feldstärke – zwischen 0,86 und 4 m<sup>2</sup>/kWh. Die ge-

schätzten Investitionskosten werden mit 8 US \$/MJ (1981) angegeben. Da die supraleitenden Magnetfeldspeicher bisher nur in wenigen Versuchsexemplaren gebaut wurden, ist der Entwicklungsbedarf noch sehr groß.

Neben den Pumpspeicherkraftwerken konzentrieren sich die Anstrengungen auf dem Gebiet der elektrischen Energiespeicherung gegenwärtig auf nicht netzgekoppelte Kleinversorgungssysteme und auf den Antriebsbereich. Die Sekundenreserve im Verbundnetz wird dagegen – mit Ausnahme des Inselnetzes Berlin – durch angedrosselte Wärmekraftwerke sichergestellt.

In welchem Umfang weiterentwickelte Speichertechniken für Elektrizität die Nutzungsmöglichkeiten CO<sub>2</sub>-freier Stromerzeugungssysteme erweitern und damit zur CO<sub>2</sub>-Minderung beitragen können, läßt sich zur Zeit im Sinne einer technischen Potentialangabe nicht quantifizieren.

## 6.2 Neue Sekundärenergieträger und -nutzungssysteme

Zur Verminderung von energiebedingten Treibhausgasemissionen im Zusammenhang mit der Nutzung fossiler Energie ist nicht nur der fossile Primärenergieträger auszutauschen, sondern seine Umwandlungs-, Transport, Verteilungs- und Nutzungssysteme sind ebenfalls zu ersetzen. Neue Sekundärenergieträger und gegebenenfalls die modifizierte Nutzung heute verfügbarer CO<sub>2</sub>-freier Sekundärenergieträger sind vor diesem Hintergrund von Bedeutung. Behandelt werden im folgenden die Sekundärenergieträger Wasserstoff und Methanol, ein geschlossenes System zum Transport von Energie in chemisch gebundener Form (bezeichnet als nukleare Fernenergie) sowie ergänzende Systeme zur Fernwärmeversorgung.

Wasserstoff ist ein gasförmiger Energieträger, der prinzipiell in allen Verwendungsbereichen die heutigen fossilen Energieträger substituieren kann. Er läßt sich grundsätzlich aus allen fossilen Energieträgern und verfügbaren Kohlenwasserstoffen sowie mittels Elektrolyse herstellen.

Die Wasserstoffherzeugung aus fossilen Energieträgern, insbesondere aus Erdgas, ist Stand der Technik. Wasserstoff ist ein wichtiger Grundstoff für die Synthese von chemischen Verbindungen und bei Reduktionsprozessen zum Beispiel in der Metallurgie. Er wird auch bei der Verarbeitung von Mineralöl eingesetzt. Derzeit werden in der Bundesrepublik Deutschland (ohne ehemalige DDR) etwa 16 Milliarden Nm<sup>3</sup> pro Jahr verbraucht, weltweit sind es 350 Milliarden Nm<sup>3</sup> pro Jahr. Diese Wasserstoffmengen bedeuten energetisch rund 6 Millionen Tonnen SKE/a beziehungsweise 130 Millionen Tonnen SKE/a. Wasserstoff als Energieträger hätte somit eine erhebliche Steigerung der Produktionskapazitäten zur Voraussetzung. Aus Kostengründen bedient man sich heute hauptsächlich der fossilen Herstellung. Ebenfalls aus Kostengründen wurde Wasserstoff bisher noch nicht in nennenswerten Mengen energiewirtschaftlich verwendet.

Insgesamt gesehen entsteht über den Wasserstoffweg mehr CO<sub>2</sub> als bei direkter Verbrennung der fossilen Ausgangsenergieträger. Dafür entsteht das CO<sub>2</sub> aber nur am Ort der Wasserstofferzeugung. Die fossile Wasserstofferzeugung macht daher aus reiner CO<sub>2</sub>-Sicht nur dann einen Sinn, wenn CO<sub>2</sub> deponiert werden kann. In diesem Falle wären anstelle vieler dezentraler CO<sub>2</sub>-Quellen (zum Beispiel Hausheizungen) nur wenige große zentrale Anlagen mit CO<sub>2</sub>-Trennanlagen auszustatten.

Die Wasserelektrolyse wird heute zur Erzeugung von hochreinem Wasserstoff eingesetzt. Während von den heutigen Elektrolyseverfahren die Membranelektrolyse den geringsten Energiebedarf pro Nm<sup>3</sup> erzeugtem Wasserstoff aufweist, wird für das Jahr 2025 von der heute noch nicht einsatzfähigen Hochtemperatur-elektrolyse ein günstigerer Wirkungsgrad erwartet.

Im Zusammenhang mit der Wasserstofferzeugung aus elektrischem Strom ist die Frage der Verknüpfung von Elektrolyseanlagen mit nichtfossilen Kraftwerken von Interesse. Die Einkopplung von Elektrizität aus Kraftwerken mit gesicherter stetiger Stromproduktion (Wasserkraftwerke oder Kernkraftwerke mit Vollastbetrieb) ist technisch unproblematisch. Auch ein tageszyklischer Betrieb mit überwiegend stetigem Leistungsverlauf (Schwachlastbetrieb von Kernkraftwerken, solarthermisches Kraftwerk mit Speicher) läßt keine besonderen Probleme erwarten. Entwicklungsarbeit muß jedoch noch hinsichtlich des kurzzeitig intermittierenden Betriebs von Elektrolyseanlagen, wie er bei Verschaltung mit Windkonvertern und Photovoltaikanlagen üblich ist, geleistet werden.

Neben einer Wasserstofferzeugung in der Bundesrepublik Deutschland wird der Import von solarem gasförmigen Wasserstoff aus photovoltaisch und solarthermisch erzeugtem Strom und der Import von flüssigem Wasserstoff aus Strom von Wasserkraftwerken untersucht. Analysiert werden dabei Systeme, die in Ländern mit hoher Sonneneinstrahlung (Spanien, Nordafrika) die großflächige Nutzung von Sonnenenergie zur Stromerzeugung mit Elektrolyseuren zur Wasserstoffherstellung, Unter-Tage-Speichern und einer Wasserstoffrohrleitung koppeln. Solche Systeme

können prinzipiell große Energiebeiträge bereitstellen. Nutzungseinschränkungen ergeben sich jedoch durch wirtschaftliche Gesichtspunkte und aus Einschränkungen technischer, ökologischer und struktureller Art.

Eine wichtige Nutzung von Wasserstoff liegt im Wärmemarkt. Neben der bereits technisch verwirklichten Flammverbrennung ist die schadstofffreie Katalyse besonders interessant, befindet sich aber noch in der Entwicklung. Die Verstromung von Wasserstoff kann neben der konventionellen Verbrennung in Kondensationskraftwerken und in Blockheizkraftwerken auch über Brennstoffzellen erfolgen. Letztere haben noch einen beträchtlichen Entwicklungsbedarf. Reine Spitzenlasterzeugung mittels Wasserstoff kann durch Wasserstoff-Luft-Gasturbinen, Brennstoffzellen und mit Wasserstoff/Sauerstoff-Dampferzeugern erfolgen. Letztere sind technisch soweit fortgeschritten, daß ihr Einsatz zur Momentanreserve in Erwägung gezogen wird.

Wasserstoff kann insbesondere als Kraftstoff genutzt werden. Neben Sicherheitsaspekten und Fragen der Verteilungsinfrastruktur ist die Speicherung die entscheidende technische Frage. Flüssigspeicherung erfordert große Tankvolumen, die Reichweiten heutiger Versuchsfahrzeuge betragen 150 bis 200 km. Die Wasserstoffverflüssigung ist jedoch mit einem hohen Energieeinsatz (2005: 0,33 kWh<sub>el</sub>/kWh<sub>H<sub>2</sub></sub>(Hu)) verbunden. Die Speicherung in Metallhydriden erfordert relativ schwere Behälter. Mit Versuchsfahrzeugen erreicht man heute Reichweiten von 120 km, durch die Nutzung von Hochtemperaturmetallhydriden hofft man die Reichweite verdoppeln zu können. Nach heutigem Stand der Technik kann die Verwendung von Wasserstoff als Fahrzeugantrieb nur eine langfristige Perspektive sein, eine Reihe technischer Probleme sind noch für den großtechnischen Einsatz zu lösen. Durch den großen Aufwand für die Wasserstoffspeicherung und den Antrieb sind beim Wasserstofffahrzeug mit erheblichen Mehrkosten gegenüber einem Fahrzeug mit Otto- oder Dieselmotor zu rechnen.

Das technische Potential des Sekundärenergieträgers Wasserstoff ist groß, da er prinzipiell in allen Verwen-

Tabelle 18

**Durch fossilen Wasserstoff vermiedene CO<sub>2</sub>-Emissionen, deren Kosten sowie die zur Deposition anfallende CO<sub>2</sub>-Menge**

Technologie	CO <sub>2</sub> -Vermeidung kg/GJ	CO <sub>2</sub> -Depot kg/GJ	Mehrkosten in DM pro t CO <sub>2</sub> -Vermeidung	
			1987	2005
Erdgas-Reformierung . . . . .	56	76	102	115
Partielle Oxidation . . . . .	78	126	135	158
Texaco Steinkohle-Vergasung . . . . .	92	173	220	227
Koppers/Totzek-Steinkohle-Vergasung . . . . .	92	187	262	271
Winkler Braunkohle-Vergasung . . . . .	111	202	162	162
Erdgas-Cracking . . . . .	56	23	151	182
Kohle-Cracking . . . . .	92	55	652	690

dungsbereichen die heutigen fossilen Energieträger substituieren kann. Wasserstoff steht dabei jedoch in Konkurrenz zu Strom, Nah- und Fernwärme.

Die Wirtschaftlichkeitsanalyse weist für die Wasserstoffherzeugung aus fossilen Energieträgern für das Jahr 1987 Kosten von etwa 4,5 Dpf/kWh bis 12,5 Dpf/kWh aus, je nach Verfahren. Entsprechende Werte für das Jahr 2005 lauten 5,5 Dpf/kWh bis 13 Dpf/kWh. (Zum Vergleich: Erdgaspreis für die Industrie 2,7 DPF/kWh beziehungsweise 5 DPF/kWh).

Tabelle 18 zeigt die Menge an CO<sub>2</sub>, die bei einer fossilen Wasserstoffherzeugung vermieden wird, und die Menge an CO<sub>2</sub>, die deponiert werden müßte. Dabei wurde unterstellt, daß eine Energieeinheit Wasserstoff eine Energieeinheit des zur Wasserstoffherzeugung eingesetzten Primärkohlenwasserstoffs substituiert. Mit Ausnahme der Crackingverfahren muß wesentlich mehr CO<sub>2</sub> deponiert werden als vermieden wird. Bei allen Technologien entstehen bei diesem gedachten Substitutionsprozeß erhebliche Mehrkosten der CO<sub>2</sub>-Vermeidung, die in einem Bereich von 115 bis 690 DM/t CO<sub>2</sub> für das Jahr 2005 liegen. Diese Kosten beinhalten noch nicht die Kosten für die Entsorgung des am Ort der Wasserstoffherzeugung anfallenden Kohlendioxids, die in einer Größenordnung von 100 DM/t CO<sub>2</sub> liegen.

Die Kosten einer CO<sub>2</sub>-Vermeidung bei Einsatz von Elektrolysewasserstoff lassen sich als Funktion der Stromgestehungskosten angeben. Die spezifischen Mehrkosten der CO<sub>2</sub>-Vermeidung bei Einsatz von Elektrolysewasserstoff zur Wärmeerzeugung betragen beim Stand der Elektrolyse im Jahr 1989 (1000 DM/kW<sub>e</sub>, Wirkungsgrad 65 Prozent) zwischen 262 DM/t CO<sub>2</sub> bei 5 Dpf/kWh Stromkosten und 6000 h/a Auslastung der Elektrolyse und 1204 DM/t CO<sub>2</sub> bei 20 Dpf/kWh Stromkosten und 2000 h/a Auslastung. Durch erwartete Fortschritte in der Elektrolysetechnik (800 DM/kW<sub>e</sub>, Wirkungsgrad 71 Prozent) reduzieren sich diese Zahlen für das Jahr 2005 auf 158 DM/t CO<sub>2</sub> und 970 DM/t CO<sub>2</sub>. Als Vergleichsgrößen für die Berechnungen wurden der CO<sub>2</sub>-Emissionsfaktor für den

Wärmemarkt und die HEL-Preise für Großabnehmer abzüglich der Verteilungskosten herangezogen.

Tabelle 19 zeigt die Gestehungskosten für Wasserstoff aus verschiedenen Wasserstoffherzeugungssystemen und die CO<sub>2</sub>-Minderungskosten bei der Substitution fossiler Energieträger im Jahr 2005. Es zeigt sich, daß bei allen Erzeugungssystemen mit erheblichen Mehrkosten zu rechnen ist.

Ebenso wie Wasserstoff läßt sich auch Methanol als Energieträger aus Erdöl, Erdgas und Kohle herstellen. Im Gegensatz zu Wasserstoff entsteht jedoch auch bei der Verbrennung von Methanol CO<sub>2</sub>. In allen drei Anwendungsbereichen Raumwärme, Prozeßwärme und Verkehr ist der dezentral anfallende CO<sub>2</sub>-Emissionsanteil bei der Methanolanwendung um etwa 20 Prozent niedriger als bei der direkten Verwendung von Mineralölprodukten. Die zentral bei der Methanolherzeugung anfallende CO<sub>2</sub>-Menge ist jedoch – außer beim Einsatz von Erdgas als Primärenergieträger – erheblich größer als die durch den Methanoleinsatz verringerten dezentralen CO<sub>2</sub>-Emissionen.

Die Herstellung von Methanol ist Stand der Technik. Die Verwendung von Methanol in Kraftfahrzeugen wurde in Flottenversuchen erprobt, die Verbrennung zu Wärmeerzeugung ist technisch möglich. Aus Kostengründen hat sich Methanol als Treibstoff in Europa bisher nicht durchgesetzt.

Die betrachteten, zu Beginn dieses Kapitels erwähnten ergänzenden Systeme zur Fernwärme reduzieren die dezentral anfallenden Emissionen beim Endverbraucher auf Null. Sie reduzieren auch die zentral anfallenden Emissionen gegenüber der klassischen Fernwärmeversorgung, weil bisher nicht genutzte niedertemperaturige Abwärmequellen genutzt werden können.

Kalte Fernwärme macht die Nutzung von Abwärmequellen niedriger Temperatur möglich. Dies führt jedoch nur dann zu einer CO<sub>2</sub>-Reduktion, wenn die Emissionsminderung nicht durch den Einsatz von Wärmepumpen wieder aufgehoben wird.

Tabelle 19

### Energiegestehungskosten und CO<sub>2</sub>-Minderungskosten von Wasserstoff bei unterschiedlicher Erzeugung im Jahr 2005

Systemart	Wasserstoffgestehungskosten im Inland bzw. an Grenze (Dpf/kWh)	Kosten der CO <sub>2</sub> -Vermeidung gegenüber dem Einsatz fossiler Energie (DM/tCO <sub>2</sub> )
Gasförmiger Wasserstoff		
– Solarstrom .....	45	1 370 <sup>1)</sup>
– Kernenergie .....		310 <sup>2)</sup>
– Import .....	31–41	886–1 238 <sup>1)</sup>
Flüssiger Wasserstoff		
– aus Wasserkraft (Import) .....	47	490 <sup>3)</sup>

Den Bandbreiten liegen unterschiedliche Systemkonfigurationen zugrunde.

<sup>1)</sup> Substitution von fossiler Energie im Wärmebereich (0,30 kg/kWh Endenergie).

<sup>2)</sup> Substitution von einer Energieeinheit HEL durch Wasserstoff.

<sup>3)</sup> Substitution von Treibstoffen (0,29 kg/kWh Treibstoff).

Mobile Fernwärme kann nur dann einen Beitrag zur CO<sub>2</sub>-Emissionsminderung leisten, wenn dadurch neue (zum Beispiel kleine) Wärmequellen erschlossen werden können.

Technisch realisiert sind die betrachteten ergänzenden Systeme der Fernwärme bisher nicht. Für die kalte Fernwärmeversorgung wurden Planstudien durchgeführt, für die mobile Fernwärmeversorgung wurden Transportfahrzeuge entwickelt, die nukleare Fernenergie wurde ebenfalls in der Vergangenheit in ihren wichtigsten Komponenten im Prototyp erprobt. Abschätzungen der technischen CO<sub>2</sub>-Minderungspotentiale liegen nicht vor.

Mit nuklearer Fernenergie wird ein Wärmeversorgungssystem bezeichnet, daß keinerlei fossile Rohstoffe verbraucht. Die primäre Energieerzeugung erfolgt in einem Hochtemperaturreaktor, der Transport und die Verteilung des Sekundärenergieträgers erfolgt leitungsgebunden, die Nutzung der Endenergie ist emissionsfrei. Genaue Kostenanalysen liegen nicht vor. Es zeichnet sich jedoch ab, das derzeit ein wirtschaftliches Potential nicht gegeben ist.

Das technische CO<sub>2</sub>-Minderungspotential der in diesem Kapitel betrachteten Techniken ergibt sich bei Wasserstoff und Methanol aus den Substitutionsmöglichkeiten. Technisch könnte mit Wasserstoff und Methanol der gesamte Endenergieeinsatz von Mineralölprodukten und Erdgas abgedeckt werden. Das so

ermittelte technische CO<sub>2</sub>-Minderungspotential ist jedoch nicht aussagekräftig. Der Einsatz von Methanol zur CO<sub>2</sub>-Minderung erscheint durch die im Vergleich zu den zu deponierenden CO<sub>2</sub>-Mengen geringen CO<sub>2</sub>-Einsparungen bei der Endenergienutzung wenig sinnvoll. Die Verwendung von Methanol als auch die Nutzung von Wasserstoff führen zu hohen CO<sub>2</sub>-Minderungskosten.

**7. Kohlendioxid-Entsorgungstechniken<sup>1)</sup>**

Entschließt man sich weltweit – oder ist es aus irgendeinem Grunde unvermeidlich – fossile Brennstoffe in Zukunft weiterhin in großem Maßstab für die globale Energieversorgung einzusetzen, so kann dies in einem klimaverträglichen Sinn gegebenenfalls dann erfolgen, wenn das entstehende Kohlendioxid weitgehendst aus den entsprechenden Prozessen abgetrennt und außerhalb der Erdatmosphäre endgelagert wird. Einen Überblick über die hier bestehenden Möglichkeiten gibt Abbildung 12.

<sup>1)</sup> Dieser Teil wurde im Rahmen der zusammenfassenden Energiestudie (vgl. Kapitel 6) von Prof. Voß federführend bearbeitet.

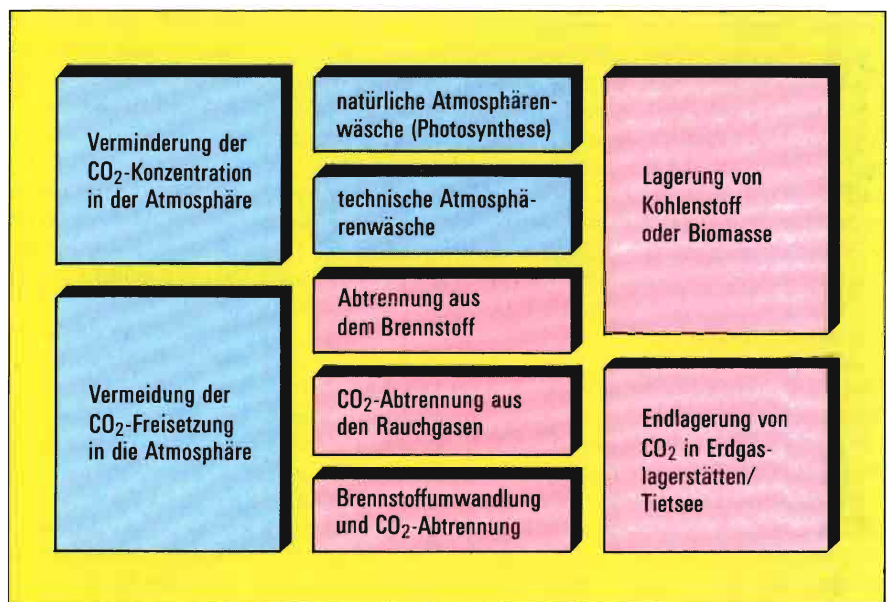


Abb. 12: Entsorgungsmöglichkeiten von CO<sub>2</sub> bei Nutzung fossiler Energieträger

### 7.1 Möglichkeiten der Entsorgung von Kohlendioxid

Bei den Rückholtechniken aus der Atmosphäre unterscheidet man zwei Ansätze: die natürliche Photosynthese durch Aufforstung sowie die technische Atmosphärenwäsche, bei der das CO<sub>2</sub> aus der Atmosphäre abgetrennt und anschließend endgelagert oder in einen neuen Kohlenwasserstoff-Brennstoff umgewandelt wird. Bei der natürlichen Photosynthese sind sehr große Landflächen nötig. Sollten beispielsweise die derzeit weltweit emittierten 22 Milliarden Tonnen CO<sub>2</sub> durch Aufforstung mit Hartholzlaubwald aus der Atmosphäre herausgefiltert werden, so wäre ein Flächenbedarf von 10 Millionen km<sup>2</sup> notwendig, dies entspricht der Landfläche Brasiliens, Venezuelas und Kolumbiens. Bei der technischen Atmosphärenwäsche wird demgegenüber eine große Menge an Fremdenergie benötigt. Eine Rückholung des CO<sub>2</sub> aus dem verdünnten atmosphärischen Zustand stellt somit keinen sinnvoll nutzbaren Weg dar.

Die Bindung des abgetrennten CO<sub>2</sub> an einen Feststoff zur Bildung eines festen Endlagergutes scheidet aus energetischen Gründen aus: der Energieaufwand ist im allgemeinen höher als der Heizwert des Energieträgers, aus dem das CO<sub>2</sub> entstanden ist, so daß diese Art der Endlagerung ein endothermer Prozeß darstellen würde. Es ergibt sich, daß lediglich ein Prozeß in der Natur geeignet erscheint, das CO<sub>2</sub> exotherm binden zu können: die Nachahmung der natürlichen Silikatverwitterung. Dabei wird das CO<sub>2</sub> in wasserlösliches Hydrogenkarbonat umgewandelt, das im Meer entsorgt werden könnte. Der Nachteil dieses Verfahrens ist die langsame Kinetik der Umwandlung und es muß betont werden, daß diese Methode zunächst nur als Konzeptidee aufzufassen ist.

Auch die Inventarisierung von CO<sub>2</sub> in Form nützlicher Gebrauchsgüter des Alltags (zum Beispiel Getränkeindustrie, Kühlsysteme, Feuerlöscher, Dünger, tertiäre Ölgewinnung, Pipelinetransport von Kohlenstaub in flüssigem CO<sub>2</sub>, Arzneimittel usw.) kann aufgrund der relativ geringen Potentiale gegenüber den großen Mengen an zu entsorgendem CO<sub>2</sub> nicht als großtechnische Möglichkeit zur CO<sub>2</sub>-Entsorgung betrachtet werden. Die pyrolytische Abtrennung des Kohlenstoffs aus Kohle und Kohlenwasserstoffen in Form von Ruß (der sogenannte HYDROCARB-Prozeß) und dessen Endlagerung erscheint nicht sinnvoll, weil dadurch zuviel Energie in Form des energetisch nicht genutzten Kohlenstoffs verloren geht. Im Falle der Kohle (CH<sub>08</sub>) können beispielsweise nur noch ca. 18 Prozent des Energieinhaltes genutzt werden und im Falle des wasserstoffreichen Methans (CH<sub>4</sub>) sind es knapp 50 Prozent.

Alle sonstigen Verfahren der CO<sub>2</sub>-Entsorgung, die auf der Separierung des CO<sub>2</sub> in Energiewandlungsanlagen beruhen und die später noch zu diskutieren sind, sind auf eine klimaverträgliche Endlagerung (Deponierung) des CO<sub>2</sub> angewiesen. Deshalb sollen zunächst die Endlagermöglichkeiten von CO<sub>2</sub> beschrieben werden. Prinzipiell existieren nur drei Möglichkeiten, um CO<sub>2</sub> in großem Umfang endzulagern. In der Reihenfolge steigenden Energieaufwandes (für die Endlagerung) sind dies:

1. Das Zurückpumpen von gasförmigem CO<sub>2</sub> in leere Erdgasfelder (Aufwand: ca. 26,4 kWh<sub>el</sub>/t CO<sub>2</sub>);
2. Das Verpressen von flüssigem CO<sub>2</sub> in Küstennähe im Meer (Aufwand: ca. 106 kWh<sub>el</sub>/t CO<sub>2</sub>);
3. Die Meeresversenkung von festem CO<sub>2</sub>-Eis auf hoher See (Aufwand: ca. 375 kWh<sub>el</sub>/t CO<sub>2</sub>).

Die eleganteste Methode, das Zurückpumpen in leere Erdgasfelder, leidet darunter, daß es zur Zeit keine großen leeren Erdgasfelder gibt (sie stehen erst ab etwa dem Jahr 2020 zur Verfügung, wenn die großen Erdgasfelder in den Niederlanden und in Westsibirien geleert sein werden) und daß darin theoretisch nur das aus Erdgas erzeugte CO<sub>2</sub> „Platz“ finden würde. Das „Kohle-CO<sub>2</sub>“ und das „Erdöl-CO<sub>2</sub>“ müßte aber ebenfalls endgelagert werden können. Dies gilt insbesondere dann, wenn die Kohle als am reichlichsten vorhandene fossile Ressource vermehrt genutzt werden sollte. Zur Aufnahme sehr großer Mengen an CO<sub>2</sub> käme als Deponie nur das Meer in Frage.

Das Prinzip der Meeresendlagerung beruht darauf, daß unterhalb einer Tiefe von 3000 m die Dichte von flüssigem CO<sub>2</sub> höher ist als jene des Meerwassers, so daß dieses von selbst auf den Meeresgrund absinkt. Der natürliche hydrostatische Druck des Meeres und sein natürlich-großes „Druckgefäßvolumen“ wird als vorgegebenes Behältnis für das Kohlendioxid benutzt. Die ozeanographischen Verhältnisse in der Tiefsee sind so, daß ein horizontaler Masseaustausch relativ rasch erfolgt, während aber der vertikale Austausch aufgrund des anisotropen turbulenten Diffusionskoeffizienten relativ langsam stattfindet, so daß mit Rückhaltezeiten für das CO<sub>2</sub> in der Größenordnung von 500 bis 1000 Jahren gerechnet werden kann. Dies ist hinreichend für eine weitere Nutzungsphase für fossile Brennstoffe in der Größenordnung von 50 bis 100 Jahren. Nach einigen Jahrtausenden würde sich dann asymptotisch eine Gleichgewichtskonzentration mit der Atmosphäre einstellen, die von der insgesamt durch die Verbrennung fossiler Energieträger erzeugten CO<sub>2</sub>-Menge abhängt.

Die Einbringung von CO<sub>2</sub> in die Tiefsee kann einmal durch eine Verpressung von flüssigem CO<sub>2</sub> oder durch eine CO<sub>2</sub>-Eisversenkung erfolgen. Die Injektion von flüssigem CO<sub>2</sub> in die Tiefsee ist nur an Steilküsten mit der notwendigen Meerestiefe möglich, gegebenenfalls ließen sich auch natürliche Meeresströmungen (Fallströmungen) für die Verbringung des flüssigen CO<sub>2</sub> nutzen. Die CO<sub>2</sub>-Eisversenkung kommt dann in Frage, wenn keine Steilküsten in angrenzenden Ozeanen vorhanden sind und das CO<sub>2</sub> per Schiff auf die offene See transportiert werden muß. Für Westeuropa ist die nächstgelegene potentielle Endlagerstätte für CO<sub>2</sub> in der Biskaya (ca. 300 km westlich von Bordeaux). Desweiteren finden sich noch im Mittelmeer (zwischen Sardinien und Italien) sowie im östlichen Becken nahegelegene Stellen, bei denen eine CO<sub>2</sub>-Endlagerung möglich wäre. Die Nord- und Ostsee sind für diese Zwecke nicht tief genug. Die für eine CO<sub>2</sub>-Endlagerung geeigneten Stellen liegen folglich alle relativ weit weg, so daß der CO<sub>2</sub>-Eisversenkung für die Deponierung eine wichtige Rolle zukommt. Ein Pipeline-Transport von flüssigem CO<sub>2</sub> an die Küsten von Frankreich und Spanien wäre vorstell-

bar, wo dann die Vereisung stattfindet und Entsorgungsschiffe das CO<sub>2</sub>-Eis im Atlantik versenken.

Um beurteilen zu können, ob die Meeresendlagerung von CO<sub>2</sub> ein zeitlich befristeter, für einige Jahrzehnte gangbarer und verantwortbarer Weg wäre, den Anstieg der atmosphärischen CO<sub>2</sub>-Konzentration zu begrenzen, sind weitergehende Untersuchungen zu eventuellen ökologischen Nebenwirkungen durch die Erhöhung der Kohlenstoffkonzentration sowie zur Pufferwirkung und zum Rückhaltevermögen der Tiefsee notwendig. Daneben wären auch die Entsorgungstechniken noch zu entwickeln und zu erproben.

## 7.2 Vermeidung von Kohlendioxid-Emissionen bei fossil gefeuerten Kraftwerken

Die Konzentration von CO<sub>2</sub> in den Rauchgasen von konventionellen Öl-, Kohle- oder Naturgas-befeuerten Kraftwerken ist relativ niedrig und beträgt je nach Brennstoff zwischen 8 und 15 Prozent. Für diesen Konzentrationsbereich ist eine chemische CO<sub>2</sub>-Absorption auf der Basis von Monoethanolamin geeignet. Trotz des relativ hohen Energieverbrauchs (ca. 5 GJ je Tonne CO<sub>2</sub>) bei der Desorption wird der Wirkungsgradeinbruch des Kraftwerks dadurch in Grenzen gehalten, daß Niedertemperaturdampf bei ca. 150 °C, der weitgehend seine Arbeitsfähigkeit verloren hat, dem Niederdruckteil der Dampfturbine entnommen wird. Es gelingt so, das CO<sub>2</sub> vom Rauchgas mit einer Abscheideeffizienz von 90 Prozent abzutrennen. Neuere Aminkompositionen der Firma Dow Chemical schützen auch gegen Korrosion bei Anwesenheit von geringen Mengen von Sauerstoff und Wasserdampf. Es zeigt sich, daß die Wirkungsgradeinbußen von 7 Prozent-Punkten (ohne Endlagerung) für ein Naturgas-Kraftwerk geringer sind als für ein Kohlekraftwerk mit 11 Prozent-Punkten (ohne Endlagerung), was im wesentlichen auf den geringeren spezifischen CO<sub>2</sub>-Emissionen des ersteren beruht.

Eine andere Möglichkeit der Minderung von CO<sub>2</sub>-Emissionen bei fossilen Kraftwerken stellt die Abtrennung von CO<sub>2</sub> vor der Gasverbrennung bei Gasturbinen/Dampfturbinenkraftwerken (GuD) dar. Dabei wird zum Beispiel das durch eine Vergasung von Kohle gewonnene Synthesegas mit Hilfe der CO-Shiftreaktion vollständig in ein H<sub>2</sub>/CO<sub>2</sub>-Gemisch überführt, worin das CO<sub>2</sub> in weit höherer Konzentration als im normalen Rauchgas vorliegt. Deshalb kann hier eine physikalische CO<sub>2</sub>-Wäsche (etwa SELEXOL) angewendet werden, wozu nur relativ wenig elektrische Kompressionsenergie nötig ist, so daß die Wirkungsgradeinbuße auf 6 Prozent-Punkte (ohne Endlagerung) begrenzt bleibt. Der Endwirkungsgrad liegt hier etwa ein Drittel höher als bei der Rauchgaswäsche. Dies zeigt, daß in der GuD-Kraftwerkstechnologie, die ohnehin auf der Entwicklungslinie der zukünftigen Kohleverstromung liegt, die Möglichkeit für eine relativ effiziente CO<sub>2</sub>-Entsorgung liegt, mit einer Erhöhung der Stromerzeugungskosten unter Berücksichtigung der Kosten der Deponierung im Bereich von ca. 25 Prozent (heimische Kohle, Verpressung des CO<sub>2</sub> in leeren Erdgasfeldern) bis ca. 80 Prozent (Importkohle, Meeresversenkung von

festem CO<sub>2</sub>-Eis), wenn eine Kraftwerksauslastung von 6000 h/a zugrunde gelegt wird.

Die geschätzten totalen CO<sub>2</sub>-Minderungskosten liegen für ein GuD-Kraftwerk mit integrierter Kohlevergasung im Bereich von etwa 32 DM/t CO<sub>2</sub> (Importkohle) beziehungsweise 43 DM/t CO<sub>2</sub> (deutsche Steinkohle) bei einer Verpressung von CO<sub>2</sub> im leeren Erdgasfeld bis ca. 87 DM/t CO<sub>2</sub> (Importkohle) beziehungsweise 129 DM/t CO<sub>2</sub> (deutsche Steinkohle) bei einer Meeresversenkung von festem CO<sub>2</sub>-Eis, wenn wiederum eine Kraftwerksauslastung von 6000 h/a angenommen wird. Bei einer Auslastung der Steinkohlekraftwerke von 4000 h/a steigen die CO<sub>2</sub>-Minderungskosten in den entsprechenden Werten auf 43 beziehungsweise 54 DM/t CO<sub>2</sub> bis 112 beziehungsweise 154 DM/t CO<sub>2</sub> an. Da sich die CO<sub>2</sub>-Deponierung im Gegensatz zu den anderen CO<sub>2</sub>-Minderungsmaßnahmen noch in einem konzeptionellen Stadium befindet, könnten für das Jahr 2005 nur geringe Beiträge zu einer Verminderung der CO<sub>2</sub>-Emissionen erwartet werden.

Eine weitere Variante der CO<sub>2</sub>-Abtrennung stellt die allothermische Vergasung von Kohle mittels CO<sub>2</sub>-freier Prozeßwärme in GuD-Kraftwerken dar. Dabei wird CO<sub>2</sub>-freie Prozeßwärme eingekoppelt, so daß die Vergasung mit reinem Wasserdampf erfolgt und auf die relativ energieintensive Sauerstoffherstellung, die meist bei autothermischer Vergasung nötig ist, verzichtet werden kann. Ein Hochtemperaturprozeßwärmeraktor ist für die Prozeßwärmeerzeugung besonders geeignet. Auch hier wird das Synthesegas in ein CO<sub>2</sub>/H<sub>2</sub>-Gasgemisch überführt und die CO<sub>2</sub>-Abtrennung physikalisch durchgeführt. Der untere für die Prozeßwärme nicht mehr nutzbare Temperaturbereich des Heliumgases des Hochtemperaturreaktors wird zur Stromerzeugung benutzt, die in den meisten Fällen für die Entsorgung des abgetrennten CO<sub>2</sub> ausreicht.

Die Verbrennung mit reinem Sauerstoff ist eine weitere Möglichkeit zur Minderung der CO<sub>2</sub>-Emissionen bei fossil-befeuerten Kraftwerken. Hier wird, um hohe CO<sub>2</sub>-Konzentrationen im Rauchgas von konventionellen fossil befeuerten Kraftwerken direkt zu erzielen, der Brennstoff mit reinem Sauerstoff verbrannt, so daß sich kein Stickstoffgas mehr im Rauchgas befindet. Eine Gaswäsche erübrigt sich so. Eine 650 kW<sub>el</sub> Testanlage existiert in den USA. Es ergibt sich, daß die Sauerstoffverbrennung mit einer Wirkungsgradeinbuße von 13 Prozent-Punkten gegenüber der Rauchgaswäsche (Wirkungsgradeinbuße 11 beziehungsweise 6 Prozent-Punkte) energetisch unterlegen ist. Die Verbrennung mit reinem Sauerstoff kann dann interessanter werden, wenn es gelänge, den energetischen Aufwand für die Lufttrennung merklich zu reduzieren. Es wird deshalb angeregt, verbesserte Lufttrennverfahren zu entwickeln (zum Beispiel das Bariumperoxid-Verfahren).

Zusammenfassend kann man zur Vermeidung der CO<sub>2</sub>-Emissionen aus fossil-befeuerten Kraftwerken sagen, daß die Gaswäschen ausgereifere Prozesse sind als die Sauerstoffverbrennung. Sie werden zum Beispiel routinemäßig in Ammoniakfabriken eingesetzt. Die GuD-Technik mit integrierter Kohlevergasung ist der reinen Sauerstoffverbrennung derzeit

überlegen. Bei diesem Verfahren muß unter den vorgegebenen Randbedingungen für die CO<sub>2</sub>-Entsorgung eine Erhöhung der Stromerzeugungskosten aus Steinkohlekraftwerken in Höhe von rund 7 Pf/kWh<sub>el</sub> aufgebracht werden. Einige der CO<sub>2</sub>-Abtrennungsvorgänge ließen sich auch auf andere Feuerungsanlagen beziehungsweise Umwandlungsanlagen mit CO<sub>2</sub>-Emissionen anwenden. Eine notwendige Voraussetzung für die Anwendung dieser Maßnahmen ist jedoch, daß eine Meeresendlagerung des abgetrennten CO<sub>2</sub> klimaverträglich möglich ist.

## 8. Emissionsminderung durch technische und verkehrspolitische Maßnahmen im Verkehr<sup>1)</sup>

In diesem Arbeitsschwerpunkt des Studienpaketes „Konzeptionelle Fortentwicklung des Verkehrsberichts“ werden der Energieverbrauch und die klimarelevanten Emissionen des motorisierten Personen- und Güterverkehrs in der Bundesrepublik Deutschland (ohne ehemalige DDR) für das Basisjahr 1987 und in Szenarienform für die Jahre 2005 und 2050 berechnet.

Der Verkehrsbereich ist damit der einzige Energieverbrauchssektor, in dem simultan alle Möglichkeiten der Emissionsminderung (einschließlich des Verzichts auf Energiedienstleistungen) behandelt wurden. Für die rein technischen Maßnahmen durch rationelle Energienutzung am Fahrzeug sei auf die Ergebnisse unter Nr. 2.2 und 2.3 verwiesen. Die technischen Minderungspotentiale durch rationelle Energienutzung liegen

- beim PKW bei 50 bis 60 Prozent
- bei Bussen und Lastkraftwagen sowie Elektrofahrzeugen bei 15 bis 25 Prozent und
- bei Flugzeugen ebenfalls bei 50 bis 60 Prozent.

### 8.1 Analyse der Wirksamkeit verschiedener Möglichkeiten der Emissionsminderung

Neben der Energieeinsparung am jeweiligen Fahrzeug selbst wurden folgende Kategorien zur Emissionsminderung analysiert:

- Kraftstoffeinsparungen durch Verhaltens- und Verkehrsflußverbesserungen,
- Verbesserung der Auslastungsgrade von Verkehrsmitteln und Verkehrssystemen,
- Verlagerung von Verkehrsleistung auf energetisch günstigere Systeme („modal split“) und
- Verlangsamung des Wachstums der Verkehrsleistungen des motorisierten Verkehrs.

Die Hauptergebnisse dieser Analysen seien zunächst als „technische“ Potentiale dargestellt, die in hohem Maße als organisatorische Maßnahmen zu realisieren wären.

<sup>1)</sup> Dieser Teil wurde im Rahmen der zusammenfassenden Energiestudie (vgl. Kapitel 6) von Dr. Jochem federführend bearbeitet.

## Verhaltens- und verkehrsflußbedingte Einsparung

Wesentliche Elemente dieser Emissionsminderungsmöglichkeit sind eine Verringerung der Fahrdynamik, eine Absenkung der Fahrgeschwindigkeit und eine Verflüssigung des Verkehrsablaufs gegenüber „stop and go“ oder Stausituationen.

Das Einsparpotential durch Verlangsamung und Verstetigung wird bei einer Absenkung der mittleren Fahrzeuggeschwindigkeit auf Autobahnen aufgrund des Abgas-Großversuches auf beispielsweise 30 Prozent geschätzt, wenn die Geschwindigkeit von 120 km/h auf 90 km/h zurückgenommen würde. Vergleichbar hohe Verbrauchsminderungen werden im Stadtbereich dadurch erzielt, daß das Fahrzeug den Anforderungen des Stadtverkehrs optimal angepaßt wird (zum Beispiel bezüglich der Getriebeauslegung, Begrenzung von Drehzahl und Geschwindigkeit, Start-Stop-Automatik).

## Verbesserung des Auslastungsgrades

Bei den PKW/Kombi lag der mittlere Besetzungsgrad im Jahre 1970 bei 1,73 Personen je Fahrzeug. Dieser Indikator sank bis 1987 auf 1,47 und könnte nach Aussagen der Einzelstudien bis zum Jahre 2005 auf 1,36 Pers./Fahrzeug (Trend) bis 1,41 (Reduktionsszenario) zurückfallen.

Prinzipiell sind wesentlich höhere Auslastungen der PKW vorstellbar, wenn hierzu spezielle Anreize und Maßnahmen wirksam werden (zum Beispiel Reservierung von Fahrspuren für PKW mit einer Mindestzahl an Passagieren). Würde beispielsweise eine Auslastung des Jahres 1970 wieder erreicht, so wäre bei unveränderter Verkehrsleistung eine CO<sub>2</sub>-Minderung der PKW um gut 20 Prozent möglich. Potentiale ähnlicher Größenordnung liegen auch bei öffentlichen Personenverkehrsmitteln und bei LKW im Fernverkehr (letztere wegen der Bestimmungen im Werksverkehr). Für den Straßengüterverkehr wird auch vermutet, daß die „just in time“-Produktion zu geringeren Auslastungsgraden bei Gütertransportfahrzeugen führt.

## Reduktion durch Verlagerung von Verkehrsleistungen auf energetisch günstigere Systeme

Tabelle 20 zeigt anhand der spezifischen Primärenergieverbräuche oder der spezifischen Gesamtemissionen, daß in aller Regel Energie eingespart und Emissionen vermieden werden können, wenn die gleiche Verkehrsleistung auf ein energetisch günstigeres Verkehrssystem, das heißt auf Busse und Bahnen im Personenverkehr und auf Bahnen und Schiffe im Güterverkehr, verlagert werden kann. Eine besonders große Einsparung wird dann erreicht, wenn infolge einer Verlagerung ein individuelles Verkehrsfahrzeug nicht betrieben und stattdessen ein bestehendes öffentliches Verkehrsmittel besser ausgelastet wird. Bei größeren zu verlagernden Verkehrsströmen muß jedoch davon ausgegangen werden, daß sich der Auslastungsgrad nicht merklich verändert.



**Verkehrsleistung, Energieverbrauch und Gesamtemissionen des Personen- und Güterverkehrs nach Verkehrssystemen im Jahr 1987**

	Personenverkehr				Güterverkehr					Summe
	Pkw/ Kombi/ mot. Zweir.	Busse/ SSU- Bahnen	Eisen- bahnen	Flug- zeuge <sup>3)</sup>	Eisen- bahnen	Binnen- schiffe	Lkw	Rohr- fern- leitung	Flug- zeuge <sup>3)</sup>	
Verkehrsleistung <sup>4)</sup> . . . . .	533	79	40	98	58	50	145	10	5	
Endenergie (PJ) . . . . .	1233	45	24	191	17	26	377	1	68	1981
Primärenergie (PJ) . . . . .	1355	56	51	210	39	29	419	2	75	2236
Gesamtemissionen (kt/a)										
Kohlendioxid . . . . .	97 000	4 000	3 100	15 300	2 364	2 071	30 052	101	5 450	159 000
Methan . . . . .	150	6	9	20	4	3	43	0,2	7	240
TVOG (= HC-Gesamt) . . . . .	1 230	21	12	30	5	7	163	0,2	11	1 480
Stickstoffoxide . . . . .	1 120	55	18	69	13	25	516	0,2	25	1 840
Kohlenmonoxid . . . . .	5 960	19	5	27	3	8	350	0	7	6 400
spezifische Gesamtemissionen (g/Pkm bzw. g/tkm), spez. Primärenergie (kJ/Pkm bzw. kJ/tkm)										
Kohlendioxid . . . . .	180	50	78	160	41	42	207	10	1 160	
Methan . . . . .	0,3	0,08	0,2	0,2	0,06	0,06	0,3	0,02	1,5	
TVOG (= HC-Gesamt) . . . . .	2,3	0,27	0,30	0,31	0,08	0,1	1,1	0,02	0,8	
Stickstoffoxide . . . . .	2,1	0,70	0,46	0,71	0,2	0,5	3,6	0,02	5,3	
Kohlenmonoxid . . . . .	11	0,24	0,13	0,28	0,05	0,17	2,4	0	1,4	
Primärenergie . . . . .	2 540	710	1 270	2 140	677	584	2 889	168	15 800	

1) Gesamtemissionen: Emissionen einschließlich der Emissionen der der Primärenergie vorgelagerten Kette

2) Werte für die Darstellung gerundet

3) Flugverkehrsleistung einschließlich der Auslandsstrecken

4) Mrd. Pkm bzw. tkm

Mit dieser Annahme wurde eine Verlagerung von 64 Milliarden Personenkilometer (Pkm), das sind 8,5 Prozent der Verkehrsleistung von 1987 als Folge einer veränderten Verkehrspolitik mit dem Ergebnis untersucht, daß die vermiedenen CO<sub>2</sub>-Emissionen etwa 7,7 Millionen Tonnen pro Jahr ausmachen. Eine Verlagerung von 42 Milliarden Tonnenkilometer (tkm), das entspricht 15 Prozent der Verkehrsleistung des Güterverkehrs von 1987, von der Straße und dem Flugzeug auf Schiffe und Schiene würde zu einer Verminderung der CO<sub>2</sub>-Emissionen von 9 Millionen Tonnen führen, dies sind 23 Prozent der Emissionen des Güterverkehrs des Jahres 1987.

**Einsparung durch reduzierte Erhöhung von Verkehrsleistungen im Vergleich zur Trendentwicklung**

Änderungen der Verkehrsleistungen wirken sich im allgemeinen in ungefähr gleichem Maße auf den Energieverbrauch und die Emissionen aus. So führt zum Beispiel eine um 9 Prozent niedrigere Verkehrsleistung (64 Milliarden Personenkilometer zulasten der PKW, 30 Milliarden Personenkilometer zulasten

des Flugverkehrs) zu CO<sub>2</sub>-Einsparungen von ca. 16 Millionen Tonnen, das sind 10 Prozent der Emissionen des gesamten Personenverkehrs (vgl. Abb. 13).

Insgesamt können die einzelnen Reduktionsmöglichkeiten zu einer beträchtlichen Verminderung der verkehrsbedingten klimarelevanten Emissionen führen. Unterstellt man beispielsweise

- fahrzeugbedingte Verringerungen des spezifischen Energieverbrauchs, ausgedrückt in einer prozentualen CO<sub>2</sub>-Minderung pro Fahrzeug-Kilometer bis 2005 beim PKW-Bestand um 19 Prozent, bei Bussen und Bahnen um 15 Prozent, bei Eisenbahnen um 9 Prozent und Flugzeugen um 22 Prozent sowie
- verhaltens- und verkehrsflußbedingte Einsparungen,
- verbesserte Auslastungsgrade auf dem Stand von 1970,
- eine Verlagerung von Personenverkehrsleistungen von 8 Prozent und
- eine 9 Prozent niedrigere Verkehrsleistung, gemessen an der Trendentwicklung (+29 Prozent bis 2005 gegenüber 1987), das heißt einen Anstieg der Verkehrsleistung um „nur“ 20 Prozent bis 2005,

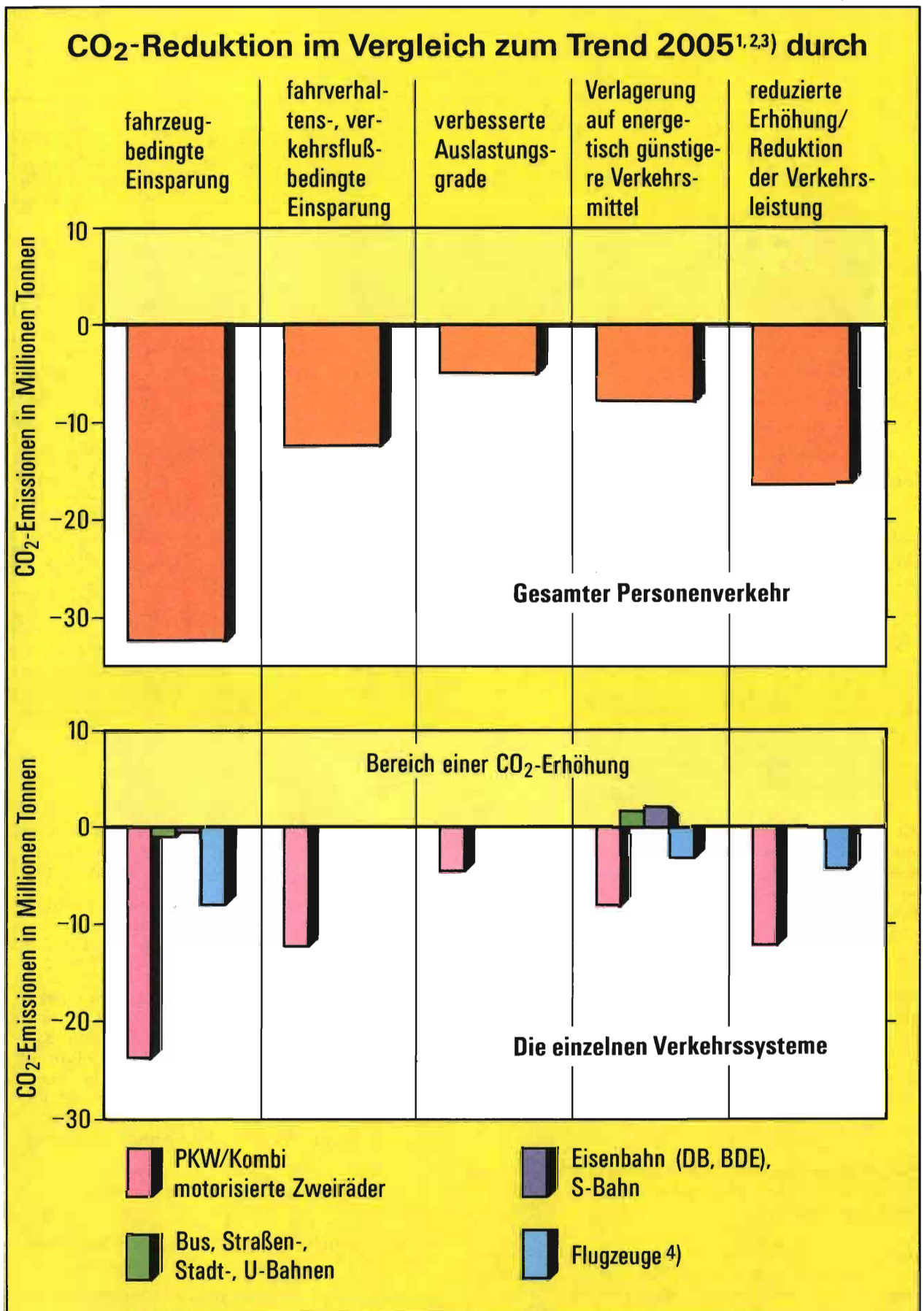


Abb. 13: Wirksamkeit der CO<sub>2</sub>-reduzierenden Maßnahmen bis 2005 im Reduktions-Szenario im Vergleich zum Trend-Szenario für den motorisierten Personenverkehr

- 1) Einschließlich der Emission der der Primärenergie vorgelagerten Kette
- 2) Die Kombination aller Maßnahmen führt zu einer CO<sub>2</sub>-Reduktion von 62 Millionen Tonnen.
- 3) 65 Millionen Wohnbevölkerung
- 4) Flugverkehr der Bundesdeutschen im In- und Ausland

so führt die Kombination dieser Maßnahmen zu einer Reduktion um 62 Millionen Tonnen CO<sub>2</sub> (Gesamtemissionen), das heißt um 43 Prozent bezogen auf die Emissionen der Trendentwicklung bis 2005.

**8.2 Darstellung der gewählten Verkehrsszenarien 2005 und 2050**

Im Studienschwerpunkt „Konzeptionelle Fortentwicklung des Verkehrsbereiches“ wurden für die Periode bis 2005 zunächst zwei Entwicklungsvarianten mit jeweils einer Bevölkerungsentwicklung von 60,1 Millionen beziehungsweise 65 Millionen Personen erarbeitet. Aus diesem Material wurden dann zwei weitere Zwischenstufen entwickelt, die für die jeweiligen Politik-Szenarien „Hemmnisabbau“ und „Energiepolitik“ konsistent gemacht werden mußten. Weiterhin wurde unterstellt, daß das Reduktionsszenario des Verkehrs mit der höchsten energie- und verkehrspolitischen Eingriffstiefe der Energiespar-Variante in Nr. 2 vergleichbar sei. Folgende wesentliche Annahmen kennzeichnen die einzelnen Verkehrsszenarien (vgl. Tab. 21):

- Im Szenario „Hemmnisabbau“ werden die Verkehrsleistungen gegenüber der Trendentwicklung nicht reduziert. Die Einsparungen werden vielmehr erzielt durch Realisierung der technischen Einsparmöglichkeiten am Fahrzeug sowie durch eine Verlagerung von 64 Milliarden Personenkilometer von PKW und Luftverkehr auf bodengebundene öffentliche Verkehrsmittel. Hierdurch reduziert sich der Endenergiebedarf bis 2005 um 506 PJ gegenüber der Trendentwicklung.
- Im Szenario „Energiepolitik“ wurde eine Verminderung der Verkehrsleistung um 30 Milliarden Personenkilometer, das heißt um 3 Prozent, infolge von ersten Erfolgen einer veränderten Siedlungs- und Stadtplanungspraxis und einer Förderpolitik zum nicht-motorisierten Personenverkehr (Fahrrad, zu Fuß gehen: +10 Prozent, das heißt 3,4 Milliarden Personenkilometer).

Außerdem wurde für beide Verkehrsbereiche eine bessere Fahrzeugausnutzung sowie eine Umverteilung weniger energieintensiver Verkehrsarten unterstellt. Im Ergebnis führt diese Annahme zu einer Verminderung des Endenergiebedarfs um 614 PJ, gemessen am Verbrauch der Trendentwicklung. Die größten

Tabelle 21

**Verkehrsleistungen, Endenergieverbrauch und CO<sub>2</sub>-Emissionen in verschiedenen Szenarien bis 2005 bezogen auf das Basisjahr 1987**

	Szenarien			
	Trend	Hemmnisabbau	Energiepolitik	Reduktion
<b>Verkehrsleistungen</b>				
– Personenverkehr (Mrd. Pers. km) .....	965	965	935	873
– Güterverkehr (Mrd. t km) .....	359	357	357	357
<b>Energieverbrauch (PJ)</b>				
– Personenverkehr .....	1 705	1 461	1 273	1 182
○ Straße .....	1 279	k. A.	905	837
○ Busse, SSU und Eisenbahnen ....	60	k. A.	87	85
○ Flugzeuge .....	366	k. A.	280	259
– Güterverkehr: .....	690	559	508	508
○ Straße .....	480	k. A.	356	356
○ Schiffe .....	30	k. A.	31	31
○ Bahnen, Rohrfernleitungen .....	19	k. A.	26	26
○ Flugzeuge .....	161	k. A.	94	94
Summe Endenergieverbrauch .....	2 395	2 020	1 781	1 690
<b>CO<sub>2</sub>-Emissionen (Mio. t)</b>				
– Personenverkehr .....	136	118	103	95
– Güterverkehr .....	56	46	42	42
Summe CO <sub>2</sub> -Emissionen .....	192	164	145	137

## Der motorisierte Personenverkehr in der Bundesrepublik Deutschland (ohne ehemalige DDR) im Jahre 2005

### Kategorisierung und Wirksamkeit der CO<sub>2</sub>-reduzierten Effekte im Reduktionsszenario 2005<sup>1,2,3</sup>)

#### CO<sub>2</sub>-Reduktion im Vergleich zum Basisjahr 1987 durch

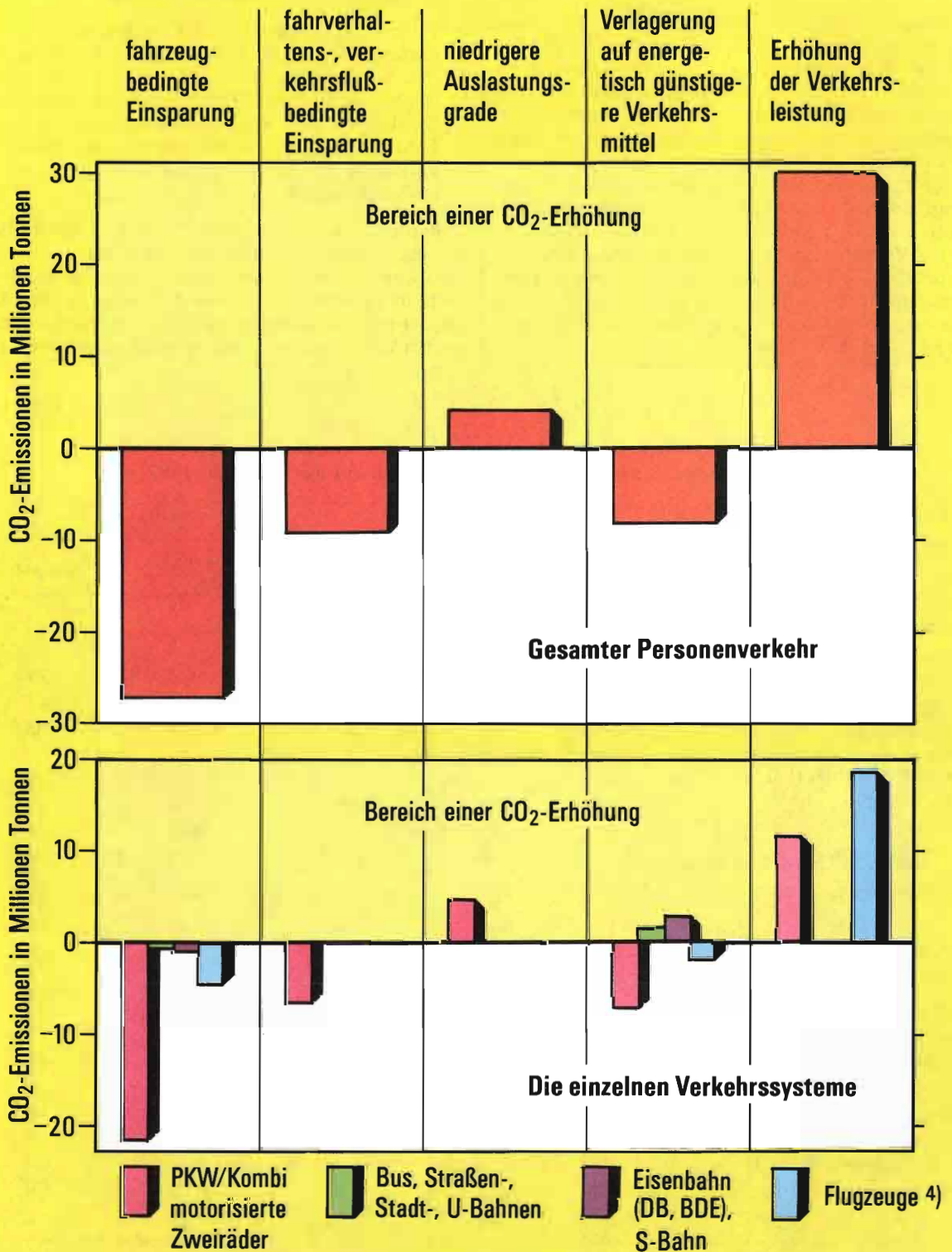


Abb. 14: Auswirkungen verschiedener Einflüsse auf die CO<sub>2</sub>-Emissionen beim motorisierten Personenverkehr im Jahre 2005

1) 65 Millionen Wohnbevölkerung

2) Einschließlich der Emission der der Primärenergie vorgelagerten Kette

3) Die Kombination aller Maßnahmen führt zu einer CO<sub>2</sub>-Reduktion von 16,5 Millionen Tonnen.

4) Flugverkehr der Bundesdeutschen im In- und Ausland

Reduktionsbeiträge liefern die Straßenfahrzeuge (minus 374 PJ oder 22 Prozent im Personenverkehr und minus 124 PJ oder 26 Prozent im Güterverkehr) sowie die Flugzeuge (minus 86 PJ oder 23,5 Prozent im Personenverkehr und minus 67 PJ oder 42 Prozent im Güterverkehr).

- Entsprechend dieser Verminderungen reduzieren sich die CO<sub>2</sub>-Emissionen bis 2005 auf 145 Millionen Tonnen, im Vergleich zur Trendentwicklung 24,5 Prozent.
- Im Trend-Szenario 2005 emittiert der motorisierte Personenverkehr 136 Millionen Tonnen CO<sub>2</sub>, das sind 16 Millionen Tonnen beziehungsweise 13 Prozent mehr als 1987. Im Reduktionsszenario 2005 betragen die CO<sub>2</sub>-Emissionen 95 Millionen Tonnen, das sind 25 Millionen Tonnen beziehungsweise knapp 21 Prozent weniger als 1987 (vgl. Tab. 21).

Zwar bringen im Reduktionsszenario 2005 die fahrzeugtechnischen Einsparungen und die Maßnahmen, die die Geschwindigkeit und Fahrdynamik der Fahrzeuge reduzieren und die den Verkehrsablauf verstetigen, ebenso eine Verminderung der CO<sub>2</sub>-Emissionen mit sich wie schließlich die Maßnahmen, die die Verkehrsleistung auf energetisch günstigere Verkehrssysteme verlagern. Doch werden diese Einsparerfolge durch eine Erhöhung der Verkehrsleistung bei PKW und Flugverkehr sowie durch eine Verschlechterung der Auslastungsgrade bei den PKW zu einem wesentlichen Teil kompensiert (vgl. Abb. 14). Ohne die für den Fall des Reduktionsszenarios 2005 erwarteten Erhöhungen der Verkehrsleistungen und Auslastungsgradverschlechterungen des motorisierten Individualverkehrs lägen die CO<sub>2</sub>-Emissionen des ansonsten unveränderten Reduktionsszenarios 2005 bei 80 Millionen Tonnen und somit 33 Prozent unter dem Basiswert von 1987.

Es gibt zahlreiche Minderungsmöglichkeiten, deren Effekte über die Annahmen des Reduktionsszenarios 2005 hinausgehen:

- Wesentlich stärkere und schnellere fahrzeugtechnische Absenkungen des durchschnittlichen Kraftstoffverbrauches der PKW, beispielsweise eine kontinuierliche Verbrauchsminderung bei den PKW-Neuzulassungen in den Jahren zwischen 1990 und 2000 auf schließlich 50 Prozent,
- stärkere Verlangsamung der Geschwindigkeiten und Verstetigung des Verkehrsablaufes,
- stärkere Erhöhung des mittleren Auslastungsgrades der Verkehrssysteme, beispielsweise im PKW-Verkehr auf 1,73 Personen/Fahrzeug (den Durchschnittswert von 1970) und bei den öffentlichen Verkehrssystemen um 20 Prozent,
- weitere Verlagerung der Verkehrsleistung auf energie günstigere Verkehrssysteme.

Bei Realisierung dieser beispielhaft genannten Minderungen könnte, falls sie über die Annahmen des Reduktionsszenarios hinaus durchgeführt würden, eine Absenkung der CO<sub>2</sub>-Emissionen des motorisierten Personenverkehrs mehr als 25 Prozent gegenüber 1987 erreicht werden.

Doch täuschen diese hohen Minderungsraten über die Schwierigkeiten hinweg, die vermutlich bereits vor der Umsetzung der Maßnahmen zu Erzielung des Reduktionsszenarios bestehen. Demgegenüber läuft die Trendentwicklung darauf hinaus, daß geringfügige fahrzeugtechnische Verbesserungen durch die Erhöhung der Verkehrsleistung beim motorisierten Individualverkehr und vor allem beim Flugverkehr mehr als ausgeglichen werden. Dieses ist insbesondere deshalb zu erwarten, da der Zusammenschluß der beiden deutschen Staaten und die für 1993 geplante Vollendung des EG-Binnenmarktes zusätzliche Personen- und Güterverkehrsleistungen induzieren werden. Daher ist nicht auszuschließen, daß im Bereich des Personen- und Güterverkehrs der Anstieg der CO<sub>2</sub>-Emissionen weiter anhält.

#### Ausblick auf 2050

Im „Trend“-Szenario 2050 emittiert der motorisierte Personenverkehr 127 Millionen Tonnen CO<sub>2</sub>, das sind 8 Millionen Tonnen beziehungsweise 7 Prozent mehr als 1987. Im Reduktions-Szenario 2050 „fossil“ betragen die CO<sub>2</sub>-Emissionen 54 Millionen Tonnen, das sind 66 Millionen Tonnen bzw 55 Prozent weniger als 1987. Die Enquête-Kommission hat für das Jahr 2050 ein Minderungsziel von 80 Prozent der gesamten CO<sub>2</sub>-Emissionen der Bundesrepublik Deutschland formuliert. Zur Erzielung weiterer Absenkungsraten müßten die fahrzeugbedingten Einsparungen beim motorisierten Individualverkehr und Flugverkehr größer sein, die gesamten Auslastungsgrade höher liegen, die Reduktionen der Verkehrsleistung größer sein und auch eine höhere Verkehrsleistung von den energetisch ungünstigeren auf die günstigeren Verkehrsmittel verlagert werden. Denn auch im Reduktionsszenario 2050 „fossil“ liegen die spezifischen CO<sub>2</sub>-Faktoren des PKW- und Flugverkehrs ungefähr doppelt so hoch wie die der Busse, Straßen-, Stadt- und U-Bahnen sowie Eisenbahnen.

Eine CO<sub>2</sub>-Minderung von 80 Prozent würde unter den Bedingungen des Reduktionsszenarios 2050 „Erneuerbare Energiequellen“ erreicht werden. In diesem Szenario sind nur noch 15 Prozent der eingesetzten Endenergie fossilen Ursprungs und somit kohlenstoffhaltig. Gerade in Anbetracht der Schwierigkeiten, die mit einer einschneidenden Reduktion der CO<sub>2</sub>-Emissionen im Verkehrsbereich vermutlich verbunden sind, ist der Einsatz erneuerbarer Energiequellen offensichtlich unverzichtbar.

Die zukünftige Entwicklung der ebenfalls direkt klimarelevanten Methanemissionen verläuft vergleichsweise parallel zu der Entwicklung der CO<sub>2</sub>-Emissionen. So nehmen die Methanemissionen des motorisierten Personenverkehrs gegenüber dem Basisjahr 1987 im Trend-Szenario 2005 um 15 Prozent zu, im Reduktionsszenario 2005 um 17 Prozent ab, im Trend-Szenario 2050 sind sie wieder auf dem Niveau von 1987 und im Reduktionsszenario 2050 „fossil“ liegen sie 55 Prozent unter dem Wert von 1987. Allerdings haben die verkehrsbedingten Methanemissionen im Vergleich zu den verkehrsbedingten Kohlendioxidemissionen hinsichtlich ihrer Klimarelevanz nur eine untergeordnete Bedeutung. Umgerechnet in CO<sub>2</sub>-Äquivalente tragen die Methanemissionen zum ver-

kehrbedingten Treibhauseffekt dieser beiden Substanzen zu ca. einem Prozent bei.

Die weiteren hier betrachteten, indirekt klimarelevanten Emissionen der Stickstoffoxide, der Gesamtkohlenwasserstoffe (TVOC) und von Kohlenmonoxid werden in den 2005-Szenarien Trend/Reduktion und in den 2050-Szenarien Trend/Reduktion „fossil“ zwischen 56 Prozent (TVOC, 2005/Trend) und 88 Prozent (CO, 2050, Reduktion „fossil“) gegenüber dem Basisjahr 1987 abgesenkt. Das Reduktionsszenario 2050 „Erneuerbare Energiequellen“ ermöglicht weitergehende Minderungen.

Die Annahmen und Berechnungen des Energieverbrauchs und der klimarelevanten Emissionen des Güterverkehrs weisen dem Güterverkehr sowohl in den Trend- als auch in den Reduktionsszenarien höhere Steigerungsraten als dem motorisierten Personenverkehr zu. Demnach machen die Erhöhungen beziehungsweise bestenfalls Stagnationen der klimarelevanten Emissionen des Güterverkehrs (1987: 40 Millionen Tonnen CO<sub>2</sub>) die zumindest in den Reduktionsszenarien vorhandenen CO<sub>2</sub>-Minderungen des Personenverkehrs zum Teil zunichte. Die CO<sub>2</sub>-Erhöhungen der Trend-Szenarien 2005 und 2050 liegen somit für den gesamten Verkehrsbereich höher als beim Personenverkehr. Die gegenüber 1987 in den Reduktionsszenarien erreichten CO<sub>2</sub>-Minderungen des gesamten Verkehrsbereichs sind geringer als für den Personenverkehr. Sie liegen bei 9 Prozent (Reduktionsszenario 2005) beziehungsweise bei 42 Prozent (Reduktionsszenario 2050 „fossil“). Der Anteil des Güterverkehrs an allen Schadstoffen des Bereichs Verkehr nimmt in allen Szenarien gegenüber dem Anteil von 1987 deutlich zu.

### 9. Konkurrierende und sich ausschließende Emissionsminderungspotentiale<sup>1)</sup>

Die in den vorangegangenen Kapiteln aufgeführten Potentiale sind jeweils ohne Berücksichtigung der Möglichkeiten anderer technischer Maßnahmen beschrieben worden. In der Realität aber beeinflussen sich die Potentiale sowohl in ihrem Umfang, als auch in ihren Kosten.

Die Abhängigkeit der Potentiale untereinander kann einmal technisch-ökonomischer Art sein, zum Beispiel: ein verminderter Strombedarf, verursacht durch rationelle Stromnutzung und Stromsubstitution, schmälert das Potential der Kernenergienutzung ab einem gewissen Kernenergieanteil an der Stromerzeugung oder erhöht dessen spezifische Kosten infolge niedrigerer Betriebsstunden bei zunehmendem Marktanteil der Kernenergie an der Stromerzeugung. Im Bereich der technischen Abhängigkeit der Minderungspotentiale sind

- sich beeinflussende Potentiale im Falle von Energiewirkungsketten und
- sich ausschließende Minderungsmaßnahmen in Falle von Substitutionsmöglichkeiten zu unterscheiden.

<sup>1)</sup> Dieser Teil wurde im Rahmen der zusammenfassenden Energiestudie (vgl. Kapitel 6) von Dr. Jochem federführend bearbeitet.

Im Falle der Energiewirkungsketten dürfen die Einzelpotentiale nicht addiert, vielmehr müssen ihre Effizienzgrade multiplikativ miteinander verknüpft werden. Denn beispielsweise vermindert eine 60prozentige Nutzenergieerzeugung an einem Gebäude aufgrund einer Wärmedämmung dieses Energieeinsparpotential des neuen Brennwertkessels in absoluten Werten erheblich, wenngleich die Steigerung des Jahresnutzungsgrades im Vergleich zum alten Kessel um vielleicht 20 Prozent sich kaum ändern mag. In diesem Beispiel errechnet sich somit die Energieeinsparung durch die zwei Maßnahmen multiplikativ zu 68 Prozent bezogen auf den Endenergieausgangswert. (Mit einem addierten Wert von 80 Prozent zu rechnen wäre falsch!)

Im Falle der Substitution von Energieträgern einschließlich erneuerbarer Energiequellen muß jeweils geprüft werden, ob der betrachtete Anwendungsbereich nicht zu mehr als 100 Prozent substituiert wird. Wenn beispielsweise die kohle- oder ölbasierte Raumwärme in geeigneten Gebäuden durch gasgetriebene Wärmepumpen substituiert wird, kann sie nicht mehr von Nahwärme oder Fernwärme aus KWK-Anlagen bedient werden. Oder: die fernwärmegeeigneten Potentiale können nur in der Gesamtschicht von fossil-, solar- oder nukleargefeuerten KWK einmal disponiert werden.

Um diese Abhängigkeit zu beachten, war es nötig, die in Nr. 2 bis 8 genannten Potentiale in konsistenter Weise zu möglichen Gesamtentwicklungs-Varianten zusammenzufassen.

Die Abhängigkeit der genannten technischen Minderungspotentiale hat aber auch eine gesellschaftliche, sozialpsychologische Komponente. Denn die hier zentrale Zielsetzung der Verminderung klimarelevanter Schadstoffe mag zu Zielkonflikten wie zum Beispiel mit den kohlepolitischen Zielen, der Akzeptanzproblematik der Kernenergie oder mit weiteren Konsumsteigerungswünschen führen, die manche Kombinationen der technischen Möglichkeiten eher unwahrscheinlich erscheinen lassen. So wird ein reichliches Angebot an Naturgas und die Überwindung von Kernenergieakzeptanzproblemen nur mit geringer Wahrscheinlichkeit dazu führen, daß die Bevölkerung und die Politik zugleich versuchen würden, Energieeinsparungspotentiale durch Verzicht auf Energiedienstleistungen zu realisieren.

Zweifellos ist dieser gegenseitigen Abhängigkeit der Emissionsminderungspotentiale nicht jene zwingende Logik eigen, wie die der o. g. technischen Abhängigkeiten. Deshalb ist es verständlich, wenn die Koordinatoren für die unten beschriebenen Reduktions-Varianten eine unterschiedliche Einschätzung zu deren werte- und politikimmanenten Konsistenz haben.

### 10. Literaturverzeichnis

Arbeitsgemeinschaft Energiebilanzen: Energiebilanzen für die Bundesrepublik Deutschland, Frankfurt 1989

Deutscher Bundestag (Hrsg.): BT-Drucksache 8/4341 „Zukünftige Kernenergiepolitik“

- Ebel, W.: Stromverbrauch im Haushalt. Institut Wohnen und Umwelt, Darmstadt 1989, S. 22, 36
- Enquête-Kommission „Vorsorge zum Schutz der Erdatmosphäre“ des Deutschen Bundestages (Hrsg.): Schutz der Erdatmosphäre – eine internationale Herausforderung, Bonn 1988, S. 491 ff.
- Feist, W., Werner, J.: Niedrigenergiehaus Schrecksbach. Institut Wohnen und Umwelt, Darmstadt 1988, S. 27f.
- Friedrich, u. a., Externe Kosten der Stromerzeugung, Frankfurt/M., 1989
- Hopf, R., Schallaböck, K.O., Steierwald, G., Wacker, M.: Konzeptionelle Fortentwicklung des Verkehrsbereichs. Zusammenfassung der Ergebnisse des Studienkomplexes A.6, Berlin / Dortmund / Stuttgart 29.05.1990
- Jochem, E., Schmitt, D., Düngen, H., Ott, V.: Wirkungsanalysen energiepolitischer Instrumente und Maßnahmenbündel zur Vermeidung und Verminderung des Energieverbrauchs und der Emission energiebedingter klimarelevanter Spurengase. Zusammenfassung der Ergebnisse des Studienkomplexes F. Karlsruhe / Essen 30.3.1990
- Karlsson, H., Radioactive Waste Diposal, The Swedish Concept, Phys. Technology, 16/1985
- Kleemann, Meli: Regenerative Energiequellen, 1988, S. 211 ff.
- Märkl: Sicherheitstechnische Ziele und Entwicklungstendenzen für die nächste Generation von LWR-Kernkraftwerken, VDI-Berichte, Düsseldorf 1990
- Meyer-Abich, K., u. a., Energiesparen: Die neue Energiequelle, München 1979 (1. Auflage)
- Meyer-Abich, K./Scheffold, B., Die Grenzen der Atomwirtschaft, München 1986
- RWE (Rheinisch-Westfälische Elektrizitätswerke): Ermittlung der „Nutzenergie“ in den Verbrauchssektoren für das Jahr 1988. Firmenmitteilung, Essen 1990.
- Schaefer, H., Geiger, B., Jochem, E., Ott, V.: Emissionsminderung durch rationelle Energienutzung. Zusammenfassung der Ergebnisse des Studienkomplexes A.1, München, Karlsruhe 15.03.1990
- Tab. 8: Technische und wirtschaftliche Potentiale erneuerbarer Energiequellen im Inland zur Stromerzeugung und Wärmebereitstellung sowie zur Emissionsminderung klimarelevanter Spurengase insgesamt bei vorgegebener moderater Preisentwicklung sowie bei höherer Energiepreissetzung
- Tab. 9: Nutzung erneuerbarer Energiequellen in den verschiedenen Reduktions-Szenarien zur Minderung klimarelevanter Spurengase
- Tab. 10: Weltweite fossile Energiereserven und Energieresourcen in Exajoule (EJ), (Stand 1989)
- Tab. 11: Erdöl- und Erdgasreserven in der Bundesrepublik Deutschland ohne ehemalige DDR (Stand 1989)
- Tab. 12: Technisches CO<sub>2</sub>-Minderungspotential der Kernenergie im Jahr 2005 sowie verbundene Minderung anderer klimarelevanter Spurengase
- Tab. 13: Technisches CO<sub>2</sub>-Minderungspotential und spezifische Minderungskosten der Kernenergie im Jahre 2005
- Tab. 14: Freisetzungbruchteile bei Kernschmelzunfällen im Vergleich
- Tab. 15: CO<sub>2</sub>-Emissionen aus der Verstromung fossiler Energieträger bei den derzeit besten Wirkungsgraden
- Tab. 16: Gesamtemission an CO<sub>2</sub> des derzeitigen Kraftwerksparks (verschiedene Wirkungsgrade)
- Tab. 17: CO<sub>2</sub>-Minderemissionen und Kraftwerksspektrum für den Referenzfall 2005
- Tab. 18: Durch fossilen Wasserstoff vermiedene CO<sub>2</sub>-Emission, deren Kosten sowie die zur Deposition anfallende CO<sub>2</sub>-Menge
- Tab. 19: Energiegestehungskosten und CO<sub>2</sub>-Minderungskosten von Wasserstoff bei unterschiedlicher Erzeugung im Jahr 2005
- Tab. 20: Verkehrsleistung, Energieverbrauch und Gesamtemissionen des Personen- und Güterverkehrs nach Verkehrssystemen im Jahr 1987
- Tab. 21: Verkehrsleistungen, Endenergieverbrauch und CO<sub>2</sub>-Emissionen in verschiedenen Szenarien bis 2005 bezogen auf das Basisjahr 1987

## 11. Tabellenverzeichnis

- Tab. 1: Annahmen über wesentliche energieverbrauchsbestimmende Größen, 1987 bis 2005
- Tab. 2: Technische Potentiale rationeller Energienutzung in der Bundesrepublik Deutschland ohne ehemalige DDR (in Prozent, bezogen auf den Endenergieverbrauch von 1987)
- Tab. 3: Entwicklung des sektoralen Energiebedarfs im Jahr 1987 und 2005 in vier Varianten der rationellen Energieverwendung
- Tab. 4: Zusätzliche Investitionsvolumen bis 2005 und Kapitalkosten für Maßnahmen rationeller Energieverwendung für die drei Varianten „Hemmnisabbau“, „Energiepolitik“ und „Energiespar“
- Tab. 5: Ausgewählte Beispiele energiebewußten Verhaltens und verminderter Nachfrage nach Energiedienstleistungen, Werte für das Jahr 2005 in Petajoule (PJ)
- Tab. 6: Technisches Potential erneuerbarer Energiequellen im Inland zur Strom- und Wärmeerzeugung sowie zur Emissionsminderung klimarelevanter Spurengase
- Tab. 7: Wirtschaftliches Potential erneuerbarer Energiequellen im Inland zur Stromerzeugung und Wärmebereitstellung sowie zur Emissionsminderung klimarelevanter Spurengase in den Jahren 2005 und 2050

## 12. Abbildungsverzeichnis

- Abb. 1: Schema der Emissionsminderungspotentiale (zum Beispiel durch rationelle Energienutzung oder Substitution mittels kohlenstoffarmer oder kohlenstofffreier Energieträger)
- Abb. 2: Energieflußdiagramm für Primär-, End- und Nutzenergie für die Bundesrepublik Deutschland (ohne ehemalige DDR) im Jahre 1988
- Abb. 3: Technische Potentiale der rationellen Energieverwendung in der Bundesrepublik Deutschland ohne ehemalige DDR (in Prozent, bezogen auf den Energieverbrauch des jeweiligen Anwendungsfeldes im Jahr 1987)
- Abb. 4: Grenzkosten von Wärmeschutzmaßnahmen an einzelnen Gebäudetypen im Gebäudebestand
- Abb. 5: Entwicklung des Energieverbrauchs der vier Endenergiesektoren 1987 bis 2005 in Abhängigkeit der Varianten „Moderat“, „Hemmnisabbau“, „Energiepolitik“ und „Energiespar“
- Abb. 6: Mögliche Veränderungen (nur durch rationelle Energienutzung) der direkten und indirekten klimarelevanten Emissionen 1987 und 2005 unter den Bedingungen der zwei Varianten „Moderat“ und „Energiespar“

- Abb. 7: Schema zu den Hemmnissen und Rahmenbedingungen sowie den Maßnahmen zur rationellen Energienutzung
- Abb. 8: Die ungleiche Wahrnehmung der Zeithorizonte technischer Potentiale zur rationellen Energienutzung und zur Energieumwandlung
- Abb. 9: Technisches Potential erneuerbarer Energiequellen zur CO<sub>2</sub>-Emissionsminderung
- Abb. 10: Technische und wirtschaftliche Potentiale der erneuerbaren Energiequellen im Inland zur Stromerzeugung und Wärmebereitstellung sowie zur Emissionsminderung von CO<sub>2</sub> bei vorgegebener moderater Preisentwicklung sowie bei höherer Energiepreissteigerung

- Abb. 11: Kosten-Potential-Funktionen für einen verstärkten Gaseinsatz in der Bundesrepublik Deutschland (ohne ehemalige DDR) im Jahr 2005 (wenn Steinkohle substituiert wird, gerechnet gegen die Preise von heimischer Steinkohle beziehungsweise von Importkohle)
- Abb. 12: Entsorgungsmöglichkeit von CO<sub>2</sub> bei Nutzung fossiler Energieträger
- Abb. 13: Wirksamkeit der CO<sub>2</sub>-reduzierenden Maßnahmen bis 2005 im Reduktions-Szenario im Vergleich zum Trend-Szenario für den motorisierten Personenverkehr
- Abb. 14: Auswirkungen verschiedener Einflüsse auf die CO<sub>2</sub>-Emissionen beim motorisierten Personenverkehr im Jahr 2005

## 5. KAPITEL

### Wege zu einer klimaverträglichen Energieversorgung – Strategien zu einer Verminderung energiebedingter klimarelevanter Spurengasemissionen

#### Vorbemerkung <sup>1)</sup>

In und außerhalb der Enquete-Kommission „Vorsorge zum Schutz der Erdatmosphäre“ besteht ein breiter Konsens über das Ziel, die Emissionen klimarelevanter Spurengase in den kommenden Jahren erheblich zu reduzieren. Die in Kapitel 4 dargelegten Ergebnisse zeigen, daß zumindest aus technischer Sicht die dort im einzelnen untersuchten Minderungsmaßnahmen jeweils für sich genommen – vor allem aber in geeigneter Kombination – nicht gegen die Realisierbarkeit auch sehr großer Reduktionspotentiale sprechen.

Es ist jedoch nicht zulässig, die jeweils ausgewiesenen Potentiale einzelner Minderungsmaßnahmen einfach zu summieren. In Kapitel 4, Nr. 9, wurde bereits darauf aufmerksam gemacht, daß bestimmte Reduktionspotentiale oftmals miteinander in Konkurrenz stehen, so daß in der Praxis nicht alle zugleich zum Zuge kommen können. Dem Problem der konkurrierenden und damit nicht addierbaren Potentiale könnte im Grunde nur mit einem gesamtsystemaren Ansatz begegnet werden, bei dem von vornherein alle zur Verfügung stehenden Alternativen berücksichtigt und – orientiert an gemeinsamen Kriterien (zum Beispiel Kosteneffizienz) – gewichtet werden. Schon bei der Vorbereitung des Studienprogramms der Enquete-Kommission war klar, daß ein solches Vorgehen in der äußerst knapp bemessenen Bearbeitungszeit nicht möglich sein würde. Allerdings bestand die Hoffnung, daß es auf der Grundlage der zahlreichen Studien zu den wichtigsten Minderungsmaßnahmen gelingen könnte, im Ergebnis dennoch hinreichend belastbare Aussagen für eine wirksame Gesamtstrategie zur Re-

duktion der Emissionen klimarelevanter Spurengase zu entwickeln.

Wesentlich dafür ist, daß die weiter oben im einzelnen beschriebenen Elemente einer solchen Strategie zu einem in sich weitgehend konsistenten – also widerspruchs- und überschneidungsfreien – „Paket“ zusammengefügt werden können. Nach der Vorgabe der Enquete-Kommission waren dabei drei Reduktionsszenarien darzustellen, die sich unter Beachtung des gemeinsamen Zieles einer Minderung der CO<sub>2</sub>-Emissionen bis zum Jahre 2005 um 30 Prozent in ihrer jeweiligen – die divergierenden energiepolitischen Auffassungen reflektierenden – Grundausrichtung unterscheiden sollten. In einem ersten Szenario, das in Nr. 1.2 vorgestellt wird, sollten der Energieeinsparung durch rationellere Energieverwendung und Verminderungen von Energiedienstleistungen beziehungsweise energiebewußteres Verhalten Priorität eingeräumt, die regenerativen Energien und die Möglichkeiten der Emissionsreduktion im Verkehrsbereich verstärkt genutzt sowie bei dem Einsatz der Kernenergie und dem Austausch fossiler Energieträger von einer Status-Quo-Entwicklung ausgegangen werden.

In einem weiteren Szenario sollten die Möglichkeiten der Emissionsreduktion unter der Voraussetzung eines Ausstiegs aus der Kernenergie bis zum Jahre 2005 geschätzt und entsprechende Hinweise auf einem bereits bis 1995 zu vollziehenden Kernenergieausstieg gegeben werden (vgl. Nr. 1.3). Schließlich war in einem dritten Szenario zu untersuchen, welche Reduktionsmöglichkeiten bei einem Ausbau der Kernenergie existieren (vgl. Nr. 1.4). Entsprechend einer späteren Vorgabe der Kommission sollte sowohl mit dem erstgenannten Reduktions-Szenario als auch mit dem Kernenergieausstiegs-Szenario bis zum Jahre 2005 dieselbe Verminderung der CO<sub>2</sub>-Emissionen erreicht werden.

Ausgangs- und Bezugspunkt für alle Reduktionsszenarien hätte an sich die Beschreibung einer Referenz-

<sup>1)</sup> Dieser Teil wurde im Rahmen der zusammenfassenden Energiestudie (vgl. Kapitel 6) von Dr. Ziesing federführend bearbeitet.



entwicklung sein sollen, die sich unter den Bedingungen eines energiewirtschaftlichen und -politischen Status-Quo ergeben dürfte. Dieses Vorgehen war nicht möglich. Zwar liegt ein Szenario vor (vgl. Nr. 1.1), doch ist es mit den Reduktionsszenarien systematisch und methodisch nicht unmittelbar vergleichbar. Der Hauptgrund hierfür liegt darin, daß die zahlreichen Einzelstudien, auf deren Ergebnissen die Reduktionsszenarien weitgehend beruhen, zeitlich parallel bearbeitet werden mußten und daher nicht auf die Ergebnisse des Referenz-Szenarios zurückgreifen konnten.

Ein weiteres Problem bei der Formulierung der Reduktionsszenarien besteht in der Verständigung über deren Elemente. Methodisch könnte es befriedigend sein, grundsätzlich von den gleichen übrigen Rahmenbedingungen auszugehen und – je nach Variante – jeweils nur einen Parameter (zum Beispiel Ausstieg aus beziehungsweise Ausbau der Kernenergie) zu variieren, um die damit verbundenen Effekte zu isolieren. Ein solcher Ansatz liefe aber Gefahr, nicht nur die energiewirtschaftlichen Interdependenzen zu vernachlässigen, sondern auch die „politische Konsistenz“ zu verletzen. So erscheint es wenig plausibel, etwa im Fall eines weiteren Ausbaus der CO<sub>2</sub>-freien Kernenergie gleichzeitig besonders starke Anstrengungen zur rationellen Energienutzung und zum Einsatz erneuerbarer Energiequellen zu unterstellen. Umgekehrt wird ein Ausstieg aus der Kernenergie bei gleichzeitiger Verfolgung des Ziels einer Reduzierung der CO<sub>2</sub>-Emissionen wie im erstgenannten Reduktions-Szenario nicht ohne erhebliche zusätzliche energiepolitische Aktivitäten auf diesen Gebieten auskommen. Aus diesen Gründen gehen die einzelnen Reduktionsszenarien teilweise auch von unterschiedlichen Rahmenbedingungen und Voraussetzungen aus. Dies ist bei der Interpretation der im folgenden skizzierten Ergebnisse zu beachten.

## 1. Entwicklung von Energiebedarf und Emissionen bis 2005<sup>1)</sup>

Die folgenden Betrachtungen zur Entwicklung des Energiebedarfs und der Emissionen beziehen sich auf den Zeitraum bis zum Jahr 2005, innerhalb dessen die CO<sub>2</sub>-Emissionen entsprechend den weiter oben skizzierten Vorgaben der Enquete-Kommission größenordnungsgemäß um 30 Prozent reduziert werden sollten.

Wie im Referenz-Szenario (vgl. Nr. 1.1), das den Reduktionsszenarien vorangestellt ist, gezeigt wird, dürfte dieses Ziel bei im wesentlichen unveränderten Rahmenbedingungen erheblich verfehlt werden. Daraus resultiert ein Zwang zum möglichst umgehenden politischen Handeln, das sich sinnvollerweise zunächst auf die besonders leicht und rasch erschließbaren Minderungsmaßnahmen konzentrieren dürfte, dann aber gegebenenfalls auch eingriffsintensivere Maßnahmen nicht ausschließen kann.

<sup>1)</sup> Dieser Teil wurde im Rahmen der zusammenfassenden Energiestudie (vgl. Kapitel 6) von Dr. Ziesing federführend bearbeitet.

Wirksame Reduktionsstrategien sollten sich allerdings nicht allein auf die Problembewältigung innerhalb der bis zum Jahr 2005 äußerst knapp bemessenen Periode beschränken, sondern den Blick auch auf langfristige Entwicklungen richten. Langfristig müssen die Emissionen energiebedingter klimarelevanter Spurengase schließlich noch weitaus stärker reduziert werden, als bis zum Jahr 2005 angestrebt. Ein Teil davon wird vermutlich aufgrund des sich autonom fortsetzenden technologischen Trends in Richtung hocheffizienter und emissionsarmer Systeme praktisch von selbst realisiert werden. Der wohl größere Teil der zusätzlich zu erschließenden Reduktionspotentiale setzt aber weitere politische Aktivitäten voraus. Diese müssen schon heute einsetzen, um auch solche Zukunftsoptionen offen zu halten, von denen bis zum Jahr 2005 noch kein entscheidender Reduktionsbeitrag erwartet werden kann, die aber entsprechende Vorlaufzeiten benötigen, um später zur Verfügung zu stehen. Hier ist in erster Linie an den gesamten Komplex der erneuerbaren Energiequellen (einschließlich ihrer Verknüpfungen mit dem Sekundärenergieträger Wasserstoff), aber auch an völlig neue Kraftwerkstechnologien (einschließlich der Entwicklung von Reaktoren mit größtmöglicher Sicherheit) und Energieversorgungs-systeme zu denken. Bei einer Langfristbetrachtung könnten mögliche Veränderungen in der Werthaltung der Gesellschaft zu Energie- und Umweltproblemen ebenfalls nicht vernachlässigt werden.

Ohne derartige langfristige Perspektiven zu verkennen, beschränken sich die im folgenden dargestellten Reduktionsszenarien aber nur auf die Jahre bis 2005. Dies hat unter anderem pragmatische Gründe, die einerseits in den teilweise unvollständigen Informationen über einzelne Strategieelemente zu suchen sind, andererseits in den mit zunehmendem Zeithorizont wachsenden Unsicherheiten hinsichtlich zentraler Parameter – zum Beispiel der Entwicklung der Energiepreise und der Kosten für bestimmte Systeme – für die Bewertung der jeweiligen Szenarien. Bis zum Jahre 2005 glauben sich die Verfasser noch auf einigermaßen sicherem Boden, danach eröffnet sich eine weitaus größere Spannbreite denkbarer Entwicklungen, die heute kaum zu überschauen ist. Daher bietet sich auch eine in bestimmten Zeitabständen durchzuführende Überprüfung der erreichten Reduktionsziele sowie eine Neueinschätzung der sich jeweils eröffnenden längerfristigen Reduktionspotentiale an.

### 1.1 Referenz-Szenario<sup>1)</sup>

Im Zusammenhang mit dem Studienprogramm der Enquete-Kommission wurden Referenzszenarien für die Energiebedarfsentwicklung in der Bundesrepublik Deutschland, die mögliche Bedarfsdeckungsstruktur und die energiebedingten Schadstoffemissionen erarbeitet.

Die in der Studie aufgezeigten energiewirtschaftlichen Entwicklungslinien sind das Ergebnis von so ge-

<sup>1)</sup> Dieser Teil wurde im Rahmen der zusammenfassenden Energiestudie (vgl. Kapitel 6) von Dr. Masuhr federführend bearbeitet.

nannten Status quo-Entwicklungen. Es werden keine wesentlichen energiepolitischen Eingriffe, insbesondere zur Minderung der CO<sub>2</sub>-Emissionen unterstellt. Neue CO<sub>2</sub>-arme oder CO<sub>2</sub>-freie Technologien der Energieerzeugung und -nutzung, die durch entsprechendes staatliches Handeln durchaus einen ganz wesentlichen Beitrag zur Minderung der CO<sub>2</sub>-Emissionen leisten könnten, werden bewußt nicht eingesetzt. Die Szenarien richten sich damit darauf aus, den Handlungsbedarf und damit auch die Handlungsoptionen für eine CO<sub>2</sub>-Minderungsstrategie aufzuzeigen.

Im Ergebnis zeigt die Studie deutlich, daß das von der Enquete-Kommission definierte Ziel einer etwa 30 Prozent-Reduktion des CO<sub>2</sub>-Ausstoßes bis zum Jahr 2005 unter Status quo-Bedingungen weit verfehlt wird (Reduktion bis 2005 nur 4 Prozent).

Der Primärenergiebedarf in der Bundesrepublik Deutschland (ohne ehemalige DDR) wird nach den Ergebnissen der Referenzszenarien bis zum Jahr 2005 nur geringfügig, um 1,1 Prozent sinken. Als wesentliche Determinanten der Energiebedarfsentwicklung wurden dabei berücksichtigt

- die Verfügbarkeit von Energiereserven und die Energiepreise,
- die Bevölkerungsentwicklung,
- das Wirtschaftswachstum,
- der technische Fortschritt und die Ausschöpfung von Energiesparpotentialen,
- die Umweltressourcen.

Die Untersuchung geht hier von folgenden Entwicklungslinien aus:

- Die Verfügbarkeit fossiler und nuklearer Brennstoffe ist für die nächsten 15 Jahre nicht gefährdet. Insbesondere bei Erdöl, Erdgas und Natururan beträgt aber die Lebensdauer der heute gesicherten Reserven nur 44 Jahre.
- Die Energiepreise werden bis 2005 real das Hochpreisniveau 1980/82 nicht erreichen. Zugrundegelegt werden die Preisannahmen des gemeinsamen Analyserasters, zuzüglich einer 15-Prozent-Ener-

giesteuer (2005) auf Brennstoffe beziehungsweise 7,5 Prozent auf Strom und Fernwärme.

- Die Bevölkerung sinkt auf 60,1 Millionen (1988: 61,3 Millionen).
- Das Wirtschaftswachstum wird, bezogen auf das reale Bruttosozialprodukt, im Durchschnitt der Jahre 1987 bis 2005 2,3 Prozent betragen.
- Im Verlauf der technischen Erneuerung energieverbrauchender Geräte und durch die Einführung technologischer Verfahrensverbesserungen werden erhebliche Energieeinsparungen realisiert.
- Die technisch möglichen Einsparungen werden innerhalb des Untersuchungszeitraumes aber nicht ausgeschöpft.
- Die Umweltrestriktionen nehmen zu.

Der Primärenergiebedarf wird im wesentlichen durch Mineralölzeugnisse (38 Prozent), Erdgas (22 Prozent), Steinkohle (17 Prozent) und Kernenergie (12 Prozent) gedeckt. Die erneuerbaren Energien erreichen einen Anteil von 3,7 Prozent (ohne Wärmepumpen). Ein Anteilsrückgang wird im Untersuchungszeitraum vor allem für Mineralölzeugnisse und die Steinkohle erwartet. Beim Mineralöl spielen vor allem Substitutionsprozesse im Wärmemarkt (zugunsten von Erdgas) eine Rolle. Bei der Steinkohle kommt – soweit deutsche Steinkohle angesprochen wird – eine Mengenreduktion bei der Verstromung und Fernwärmeerzeugung von heute ca. 41,0 Millionen Tonnen SKE auf 35,0 Millionen Tonnen SKE (2005) hinzu. Das Primärenergieäquivalent des Kernenergieeinsatzes sinkt von 1375 PJ in 1988 auf 1312 PJ im Jahr 2005 (minus 5 Prozent).

Die Entwicklung des Primärenergiebedarfs wird von den verschiedenen Verbrauchssektoren unterschiedlich beeinflusst.

Der Endenergieverbrauch der Haushalte (1987: 2161 PJ) wird 2005 rund 10 Prozent unter dem 87er Niveau liegen.

Der Endenergieverbrauch der Kleinverbraucher (1987: 1188 PJ) wird dagegen bis 2005 weiter ansteigen (+5 Prozent). Der Strombedarf wächst in diesem

Tabelle 1

#### Primärenergiebedarf im Jahre 1987 und 2005 nach Energieträgern in Petajoule (PJ)

	1987	2005	1987	2005
	in PJ		in %	
Steinkohle .....	2 215	1 883	19,5	16,7
Braunkohle .....	914	771	8,0	6,9
Mineralölerz .....	4 785	4 252	42,1	37,8
Gase .....	1 913	2 487	16,8	22,1
Wasserkraft, Nettoimportstrom .....	210	361	1,9	3,2
Kernenergie .....	1 234	1 312	10,9	11,7
Sonstige .....	102	185	0,9	1,6
Summe .....	11 373	11 251	100,0	100,0

Verbrauchssektor überdurchschnittlich (plus 38 Prozent).

Der Endenergieverbrauch der Industrie (1987: 2199 PJ) bleibt bis 2005 praktisch konstant.

- Der Stromverbrauch steigt gegenüber 1987 um 16,4 Prozent an. Vom gesamten Endenergieverbrauch entfallen im Jahr 1987 26,1 Prozent, im Jahr 2005 aber über 30 Prozent auf den Energieträger Strom.
- Bei den Brennstoffen ist der Rückgang der Mineralölprodukte markant. Dieser Bereich verliert 24 Prozentpunkte.
- Noch stärker sinkt der Endenergieverbrauch an Steinkohle (minus 35 Prozent). Deutliche Anteilsgewinne verbucht das Erdgas.

Für den Endenergieverbrauch des Verkehrssektors (1987: 1869 PJ) wird eine Zunahme um 3,2 Prozent erwartet. Diese Werte beziehen – im Unterschied zu den drei Reduktionsszenarien – den bundesdeutschen Anteil am internationalen Flugverkehr nicht mit ein, für den besonders hohe Steigerungsraten prognostiziert werden.

Die Zusammenfassung der Endenergieverbräuche ergibt insgesamt folgendes Bild:

Tabelle 2

**Endenergieverbrauch im Jahre 1987 und 2005<sup>1)</sup> in Petajoule (PJ)**

	1987	2005
Kohlen .....	632,3	417,3
Mineralölerzeugnisse ..	3 832,6	3 484,0
Gase .....	1 547,6	1 736,5
Strom .....	1 270,5	1 479,0
Fernwärme .....	200,8	246,5
Sonstige .....	39,9	44,6
<b>Summe .....</b>	<b>7 523,7</b>	<b>7 407,9</b>

<sup>1)</sup> In den Berechnungen der nachfolgenden Abschnitte werden gegenüber dieser Tabelle folgende analytisch zweckmäßige Modifikationen vorgenommen:

- der internationale Flugverkehr wird einbezogen
- der Endenergiebedarf im Raumwärmesektor 1987 wird temperaturbereinigt
- der industrielle Stromverbrauch wird um den Betrag des eigenerzeugten und eigengenutzten Stroms gekürzt und stattdessen die dafür eingesetzte Brennstoffmenge berücksichtigt.

Der Elektrizitätssektor ist durch folgende Merkmale gekennzeichnet:

- Der Endenergieverbrauch an Strom wächst bis 2005 um 16,2 Prozent (von 353 TWh auf 411 TWh).
- Die Stromerzeugung aus Wasserkraft steigt von 18 400 GWh/pro Jahr auf 20 300 GWh/pro Jahr.
- Die Stromerzeugung aus Kernkraft bleibt bis 2005 praktisch konstant auf dem Niveau von 1989.

- Für Müll, Holz, Stroh, Klär- und Deponiegas wird eine Erzeugung von 4,2 TWh 1987 beziehungsweise 10,1 TWh 2005 angenommen.
- Die Windenergie erreicht ein Erzeugungsvolumen von 0,6 TWh.
- Für die Photovoltaik wird nur eine Erzeugungsmenge von 9 GWh eingesetzt.

Der verbleibende Teil der Stromerzeugung wird durch Kohle- und Erdgaskraftwerke bereitgestellt, wobei der Erdgasanteil mehr als verdoppelt wird. Die folgende Tabelle gibt einen Überblick.

Tabelle 3

**Bruttostromerzeugung im Jahre 1987 und 2005 nach Energieträgern in Terawattstunden (TWh)**

	1987	2005
Kernenergie .....	130,5	146,8
Steinkohle .....	135,8	137,6
Braunkohle .....	77,8	70,1
Erdgas .....	28,7	67,9
Heizöl .....	12,3	6,3
Wasser .....	20,6	22,4
Andere Brennstoffe .....	12,4	15,5
Wind, Photovoltaik .....	0	0,6
<b>Summe .....</b>	<b>418,2</b>	<b>467,3</b>

Bei den in der Untersuchung von PROGROS analysierten Luftschadstoffen gehen SO<sub>2</sub>, CO, VOC und Staub bis 2005 um ca. 70–75 Prozent zurück. Bei Stickoxiden beträgt der Rückgang 61 Prozent. Für Kohlendioxid wird nur eine Abnahme um 4 Prozent erreicht.

Tabelle 4

**Spurengasemissionen im Jahre 1987 und 2005 in Megatonnen pro Jahr**

	1987	2005
CO <sub>2</sub> .....	715,00	695,00
CO .....	6,68	1,78
SO <sub>2</sub> .....	1,92	0,60
NO <sub>x</sub> .....	2,76	1,10

**1.2 Reduktionsszenario „Energiepolitik“<sup>1)</sup>**

Betrachtet man die Emissionsentwicklung der klimarelevanten, energiebedingten Schadstoffe in der oben genannten Status quo-Entwicklung, so fällt folgendes auf:

<sup>1)</sup> Dieser Teil wurde im Rahmen der zusammenfassenden Energiestudie (vgl. Kapitel 6) von Dr. Jochem federführend bearbeitet.

- Die NO<sub>x</sub>-Emissionen und die indirekt klimabe-deutsamen Emissionen von Kohlenmonoxid (CO) und flüchtigen organischen Verbindungen ohne Methan (NMVOC) reduzieren sich zwischen 1987 und 2005 um rund 60 Prozent (NO<sub>x</sub>) bis gut 70 Prozent (CO). Dies ist im wesentlichen auf die Umweltschutzgesetzgebung bei stationären Verbrennungsanlagen und die Einführung des Katalysators im PKW zurückzuführen.
- Die Methanemissionen aus der Erdgasgewinnung und Gasverteilungsnetzen, aus Ölgewinnung und -verarbeitung, aus Kohlebergbaugruben und Abfalldeponien wären durch entsprechende umweltschutzpolitische Auflagen innerhalb der nächsten zwei Jahrzehnte durchaus um ein Drittel reduzierbar (siehe unten).
- Schwierigkeiten bereitet am deutlichsten die Verminderung von CO<sub>2</sub>-Emissionen, die nach den Schätzungen unter den Bedingungen der Status quo-Variante für die Bundesrepublik Deutschland (ohne ehemalige DDR) lediglich auf etwa 695 Millionen Tonnen, d. h. um knapp 4 Prozent, sinken würden (vgl. Nr. 1.1).

#### Komposition und Annahmen zum Reduktionsszenario

Ziel dieser im folgenden behandelten Variante ist es deshalb, aus den in Kapitel 4, Nr. 2 bis Nr. 8 beschriebenen Möglichkeiten jene auszuwählen, die einerseits große CO<sub>2</sub>-Reduktionen ermöglichen, andererseits durch einige Rahmenbedingungen begrenzt werden. Diese sind eine Begrenzung der Expansion von Naturgas auf ca. 2500 Petajoule (PJ), ein nur begrenzter Abbau von Stein- und Braunkohlekapazitäten aus regional- und sozialpolitischen Gründen sowie keine Veränderung der Kernkraftwerkskapazität. Dieses Reduktionsszenario wurde (aus analytischen Gründen) in zwei Stufen konzipiert:

- (1) In einer ersten Stufe wurde mit der Einführung der Energiebedarfswerte der „Hemmnisabbau“-Variante (vgl. Kap. 4, Nr. 2.2) unterstellt, daß sich die Energiepreise gegenüber dem Referenzpfad (vgl. Kap. 4, Tab. 1) nicht ändern, sondern die Energiepolitik alle bestehenden Hemmnisse im Bereich der rationalen Energieverwendung, der erneuerbaren Energiequellen und der Gesamtsubstitution abbaut, so daß alle wirtschaftlichen Potentiale rationaler Energieverwendung und der erneuerbaren Energiequellen realisiert werden. Diese Energiebedarfswerte (vgl. Tab. 5) sind auch weitgehend Ausgangspunkt der „Kernenergieausbau“-Variante (vgl. Nr. 1.4).
- (2) In einer zweiten Stufe wurden dann entsprechend der Annahmen der „Energiepolitik“-Variante (vgl. Kap. 4, Nr. 2.3) weitere Möglichkeiten der rationalen Energieverwendung und der erneuerbaren Energiequellen durch Preisanhebungen für Endenergieträger oder entsprechende finanzielle Anreize (Brennstoffe und Fernwärme: plus 5,- DM/GJ und Strom: plus 2 Dpf/kWh) als realisiert unterstellt. Hierbei wurden die Substitutionsprozesse unter den fossilen Energieträgern durch

Erdgas in den Endenergiesektoren konstant gelassen (vgl. Tab. 5 und 10).

Folgende Vorgaben sind den beiden Stufen des Reduktionsszenarios gemeinsam:

- Erdgas kann bis maximal 2 500 PJ im Jahre 2005 eingesetzt werden; dies bedeutet gegenüber 1987 eine Steigerung um rund 30 Prozent (zum Vergleich: Referenz-Variante: ebenfalls 30 Prozent).
- Die Kernkraftwerkskapazität bleibt konstant, sie wird aber mit 7200 Vollaststunden, d. h. mit 82 Prozent, betrieben, so daß die Stromerzeugung auf der Basis von Kernenergie um 106 PJ auf 576 PJ (160 TWh) bis 2005 zunimmt (gegenüber 130 TWh in 1987).
- Die Summe von Stromimportsaldo und Pumpstrom bleibt mit 34,2 PJ im Jahre 2005 gegenüber 1987 konstant.
- Die Nutzung der Kraft-Wärme-Kopplung in der Industrie und im Kleinverbrauch steigt um 70 Prozent gegenüber 1987, und die fossil gefeuerten Heizkraftwerke verdoppeln ihre Lieferung von Fern- und Nahwärme sowie Strom.
- Heizwerke sind bis 2005 durch BHKW (Blockheizkraftwerke) oder Heizkraftwerke ersetzt.
- Für die Braun- und Steinkohlen sowie die Mineralölprodukte werden keine Mengenbegrenzungen angenommen. Die benötigten Mengen werden aus der Aufteilung der Stromerzeugungskapazität und den Ergebnissen der Berechnung für die Endenergieverbrauchssektoren ermittelt. Die Anteile der Nettoimporte von Mineralölprodukten wurden als konstant angenommen.

#### 1.2.1 Stufe 1: „Hemmnisabbau“

Zusätzlich zu den oben genannten gemeinsamen Vorgaben sind folgende spezielle Annahmen zu nennen (vgl. Tab. 5):

- In den Endenergiesektoren reduziert sich die Energienachfrage durch rationelle Energienutzung bei Berücksichtigung des Wachstums von Produktion, Wohnflächen, Einkommen und Verkehrsleistungen um knapp 410 PJ, d. h. um gut 5 Prozent gegenüber 1987. Diese Entwicklung der Energienachfrage unterstellt ganz erhebliche energiepolitische Anstrengungen, um bestehende Hemmnisse rationaler Energieverwendung, insbesondere in den Endenergiesektoren, abzubauen. Dabei werden auch verkehrs- und umweltschutzpolitische Maßnahmen unterstellt (vgl. Tab. 6 a bis f):
  - im Raumwärmesektor der privaten Haushalte reduziert sich der Endenergiebedarf – trotz einer Wohnflächenzunahme um 10 Prozent – um rund 30 Prozent, bezogen auf 1987. Der Strombedarf bei den Elektrogeräten reduziert sich um 43 PJ und der Energiebedarf zur Warmwassererzeugung um 46 PJ, d. h. um 17 Prozent beziehungsweise 24 Prozent.

**Zusammenstellung der emissionsmindernden Maßnahmen für die Untervariante „Hemmnisabbau“  
(1. Stufe)  
in Petajoule (PJ)**

Sektoren	1987	Änderungen 1987/2005 durch			
		rationelle Energieverwendung und Wachstum	erneuerbare Energiequellen <sup>2)</sup>	Substitution fossiler Energie <sup>6)</sup>	resultierender Energiebedarf <sup>8)</sup>
private Haushalte .....	2 034 <sup>1)</sup>	-604	- 57	- 4	1 369
Kleinverbrauch .....	1 225	- 85	- 51	- 4	1 085
Industrie .....	2 289 <sup>3)</sup>	+241	- 11	- 7	2 512
Verkehr <sup>4)</sup> .....	1 991	+ 29	0	0	2 020
nicht behandelt <sup>5)</sup> .....	123	+ 10	0	0	133
<b>Summe Endenergie .....</b>	<b>7 662</b>	<b>-409</b>	<b>-119</b>	<b>- 15</b>	<b>7 119</b>
davon:					
– Steinkohle .....	649	- 27	- 1	- 73	548
– Braunkohle .....	169	- 45	- 1	- 30	93
– Benzin .....	1 066	-260	0	0	806
– HEL .....	2 550	-107	- 83	-238	2 121
– HS .....	297	- 3	- 4	-118	173
– Gase .....	1 581	- 83	- 29	+444	1 913
– Fernwärme <sup>9)</sup> .....	195	- 25	0	-	171
– Strom .....	1 156	+141	- 2	-	1 295
<b>Kraft-Wärme-Kopplung</b>					
– Industrie .....	245	198	0	- 7	436
– Heizkraftwerke .....	254	285	- 94 <sup>7)</sup>	k.A.	539
<b>Summe KWK .....</b>	<b>499</b>	<b>483</b>		<b>- 7</b>	<b>975</b>

1) Raumwärme temperaturbereinigt auf Normaljahr

2) durch erneuerbare Energiequellen substituierte Brennstoffmengen

3) Inklusive Brennstoffe für eigenerzeugten und selbstverbrauchten Strom

4) Inklusive Treibstoffe für internationalen Flugverkehr (1987: 120 PJ)

5) dezentrale Warmwasserversorgung mit Holz und Gas, Kraft und Treibstoffe für Militär und Landwirtschaft, Strom für Wärme im Verkehr, sonstiger Strom von Kleingeräten im Haushalt

6) Minderverbrauch (netto) durch verstärkten Erdgaseinsatz

7) substituierte Brennstoffe in Endenergiesektoren und breitgestellter Strom aus biomassegefeuerter KWK; in Summe nicht berücksichtigt

8) konventioneller Energieträger

9) Fernwärme ohne zusätzliche Fern- und Nahwärmebereitstellung aus Kraft-Wärme-Kopplung

○ Trotz des Wirtschaftswachstums des Kleinverbrauchssektors um gut 50 Prozent vermindert sich dessen Endenergiebedarf um 85 PJ (7 Prozent).

○ Rationelle Energienutzung und strukturelle Änderungen können den Anstieg des industriellen Energieverbrauchs nicht völlig kompensieren, der bis 2005 noch um 241 PJ (etwa 10,5 Prozent) zunimmt.

○ Durch die technischen Verbesserungen an Fahrzeugen und Verkehrssystemen und Veränderungen des modal split gelingt es trotz einer Steigerung des Verkehrsaufkommens um 29 Prozent beim motorisierten Personenverkehr

und um 34 Prozent beim Güterverkehr, das ständige Wachstum des Energieverbrauchs des Verkehrs bis auf eine Zunahme von rund 30 PJ (1,5 Prozent) zu bremsen.

– Auch auf Seiten der erneuerbaren Energiequellen wird unterstellt, daß die wirtschaftlichen Potentiale nach Abbau bestehender Innovationshemmnisse in den Endenergiesektoren weitgehend realisiert werden können. Hier werden durch Solar-Kollektoren, Biomasse und Wärmepumpen 119 PJ Endenergie substituiert. Die größten Potentiale liegen mit 51 PJ im Kleinverbrauchssektor und mit 49 PJ im Raumwärmebereich der privaten Haushalte. Durch stroh- und biogas-gefeuerte Heizkraftwerke und Blockheizkraftwerke werden wärmeseitig

Tabelle 6a

## Vorschlag sektorspezifischer Maßnahmen: Raumwärmesektor (Ausschnitt)

Problemkreis		Stufe <sup>2)</sup>
<ul style="list-style-type: none"> <li>● Hemmnisse vermindern</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>● sektorspezifische Maßnahmenbündel</li> </ul>	
<b>Raumwärme</b>		
(1) mangelnde Kenntnisse	<ul style="list-style-type: none"> <li>● Förderung von Fortbildung (Architekten, Handwerk)<sup>1)</sup></li> <li>● Novellierung der WSchVO (auch für Altbau) und der HeizanlagenVO</li> <li>● Stichprobenkontrollen der o. g. Verordnungen</li> <li>● subventionierte Vor-Ort-Beratung<sup>1)</sup></li> </ul>	H, E H, E H, E H, E
(2) Eigner/Nutzer-Dilemma	<ul style="list-style-type: none"> <li>● Wärmepaß bei Vermietung und Verkauf</li> <li>● Begrenzung der Umlagefähigkeit hoher Heizenergiekosten</li> </ul>	H, E H, E
(3) stärkere Kostenorientierung der Preisbildung bei leitungsgebundenen Energieträgern (insbesondere Strom und Fernwärme)	<ul style="list-style-type: none"> <li>● verbrauchsabhängige Grundtarife<sup>1)</sup></li> <li>● saisonale Unterscheidung der Arbeitspreise<sup>1)</sup></li> </ul>	H, E H, E
(4) unzureichende Bewertung der Arbeitsfähigkeit von Energieträgern	<ul style="list-style-type: none"> <li>● Einführung einer Exergieabgabe auf Endenergieträger</li> </ul>	E
(5) beschränkte Finanzierungsmöglichkeiten spezieller Gruppen von Gebäudeeignern (mit niedrigem Einkommen)	<ul style="list-style-type: none"> <li>● Bürgschaften, Zinsverbilligungen oder Abschreibungsmöglichkeiten bei Energieeinsparinvestitionen der Zielgruppen<sup>1)</sup></li> </ul>	E
(6) rechtliche Hemmnisse – öffentlich geförderter Wohnungsbau	<ul style="list-style-type: none"> <li>● zeitlich befristete Möglichkeit zur Umlage von Energieeinsparinvestitionen</li> </ul>	H, E
(7) Summe der Hemmnisse als eigenständiges Problem	<ul style="list-style-type: none"> <li>● Förderung von Energiedienstleistungs- und Contracting-Unternehmen<sup>1)</sup> (Vertragsgestaltung; fallweise oder periodische Beratungspflicht)</li> </ul>	H, E

<sup>1)</sup> nicht notwendigerweise Initiative bei Bund und Ländern, sondern auch bei Selbstorganisationen der Wirtschaft und Unternehmen möglich.

<sup>2)</sup> Zuordnung zur Stufe 1 „Hemmnisabbau“: H und Stufe 2 „Energiepolitik“: E

66 PJ in den Endenergiesektoren substituiert und 28 PJ als Strom bereitgestellt. Der Ausbau der Wasserkraft wird mit 3 TWh und der Windkraft mit 1,4 TWh veranschlagt, als vermiedener Brennstoffeinsatz mit insgesamt 42,5 PJ bewertet (vgl. Tab. 8).

– In den Endenergiesektoren ersetzen 444 PJ Erdgas etwa 460 PJ kohlenstoffreichere Energieträger. In der industriellen Kraft-Wärme-Kopplung und den Heizkraftwerken nimmt der Gasanteil von 36 Prozent im Jahre 1987 auf 53 Prozent in 2005 zu.

– Für den Umwandlungssektor wurden folgende Annahmen getroffen.

- Die Raffinerien verbessern ihre Umwandlungswirkungsgrade um 13 Prozent bis 2005.
- Die Umwandlungswirkungsgrade von Braunkohle-Kondensationskraftwerken verbessern sich um 4 Prozent und von Gaskondensationskraftwerken um 5,5 Prozent.

Vorschlag sektorspezifischer Maßnahmen: Elektrogeräte, Pumpen, Ventilatoren (Ausschnitt)

Problemkreis		Stufe <sup>2)</sup>
<ul style="list-style-type: none"> <li>● Hemmnisse vermindern</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>● sektorspezifische Maßnahmenbündel</li> </ul>	
<p><b>Elektrogeräte, Pumpen, Ventilatoren</b></p>		
<p>(1) mangelnde Kenntnisse der Betreiber (Haushalte, kleine und mittlere Unternehmen) und der Händler</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>● freiwillige Selbstverpflichtungen der Hersteller (oder Verordnungen über Mindesteffizienz), periodische Revision<sup>1)</sup></li> <li>● Angabe von Jahresstromkosten gemäß DIN-Betriebsbedingungen beim Verkauf</li> <li>● Fortbildung des Verkaufspersonals der Geräte<sup>1)</sup></li> <li>● Nutzung von EDV-gestützten Beratungseinrichtungen<sup>1)</sup></li> </ul>	<p>H, E</p> <p>H, E</p> <p>H, E</p> <p>H, E</p>
<p>(2) unzureichend kostenorientierte Tarife für Strom</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>● Einführung tageszeitlich und saisonal kostenorientierter Arbeitspreise und kostenorientierter Grundpreise<sup>1)</sup></li> </ul>	<p>H, E</p>
<p>(3) mangelnde Wahrnehmung des Stromverbrauchs</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>● aktuelle Verbrauchs- und Kostenanzeigen beim Verbraucher in der Wohnung<sup>1)</sup></li> </ul>	<p>H, E</p>
<p>(4) Rechtliche Hemmnisse</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>● DIN-Normen für die Produktinformation wenig praxisrelevant oder fortschritthemmend (Einbauküchen DIN 68901)</li> <li>● mietrechtliche Probleme bei der Übernahme durch Nachmieter § 547 ff BGB</li> <li>● Leuchtmittelsteuer</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>● DIN-Normen praxisgerecht und innovationsoffen gestalten</li> <li>● Übernahmeregelungen für energiesparende Investitionen für Nachmieter</li> <li>● Abschaffung der Leuchtmittelsteuer</li> </ul>	<p>H, E</p> <p>H, E</p> <p>H, E</p>

1) Die Initiative liegt nicht notwendigerweise bei Bund oder Ländern, sondern ist auch bei Selbstorganisationen der Wirtschaft und bei Unternehmen möglich.

2) Zuordnung zur Stufe 1 „Hemmnisabbau“: H und Stufe 2 „Energiepolitik“: E

Tabelle 6c

**Vorschlag sektorspezifischer Maßnahmen: Mittelständische Branchen in Industrie und im Kleinverbrauch  
(Ausschnitt)**

Problemkreis		Stufe <sup>2)</sup>
<ul style="list-style-type: none"> <li>● Hemmnisse vermindern</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>● sektorspezifische Maßnahmenbündel</li> </ul>	
<b>mittelständische Branchen in Industrie und im Kleinverbrauch</b>		
(1) mangelnde Kenntnisse und Motivation zur Energieeinsparung und -subventionen in den Betrieben	<ul style="list-style-type: none"> <li>● Motivationsmaßnahmen für Leiter und Controller<sup>1)</sup></li> <li>● kostenfreie Initialberatung und Bereitstellung von Meßgeräten<sup>1)</sup></li> <li>● Beratungsvermittlung<sup>1)</sup></li> <li>● <i>Wärmenutzungsgebot nach BimSchG</i></li> <li>● verbesserte Umsetzung der Anforderungen nach Nr. 3.1.2 TA-Luft</li> </ul>	H, E E H, E E
(2) mangelnde Kenntnisse bei Beratern, Maschinen- und Anlagenherstellern, Installationsgewerbe	<ul style="list-style-type: none"> <li>● Fortbildung für Anwender, Berater, Hersteller, Installationsgewerbe<sup>1)</sup></li> <li>● Forschungsverbundvorhaben</li> </ul>	H, E H, E
(3) Finanzierungsgepflogenheiten mit ungleichen Rentabilitätsforderungen und Fremdfinanzierungen	<ul style="list-style-type: none"> <li>● Fortbildung und Beratung<sup>1)</sup></li> <li>● Finanzierungs- und Bürgschaftsprogramme zur Energieeinsparung</li> </ul>	H, E E
(4) Eigner-Nutzer-Dilemma bei Leasing-Objekten	<ul style="list-style-type: none"> <li>● Einführung von Energiekennzahlen für Gebäude und geleaste Objekte</li> </ul>	H, E
(5) hemmende Rahmenbedingungen z. B. zu lange Genehmigungsverfahren	<ul style="list-style-type: none"> <li>● Abbau institutioneller Hemmnisse durch Selbstverständnis der Administration als Dienstleistungsunternehmen</li> </ul>	H, E
(6) Benachteiligung der KWK durch Mineralölsteuergesetz	<ul style="list-style-type: none"> <li>● Änderung des Mineralölsteuergesetzes</li> </ul>	H
(7) Summe der Hemmnisse als eigenständiges Problem	<ul style="list-style-type: none"> <li>● Aufbau einer leistungsorientierten Energie-Agentur</li> <li>● Förderung von Contracting-Unternehmen</li> </ul>	H, E H, E

<sup>1)</sup> Die Initiative liegt nicht notwendigerweise bei Bund oder Ländern, sondern ist auch bei Selbstorganisationen der Wirtschaft und bei Unternehmen möglich.

<sup>2)</sup> Zuordnung zur Stufe 1 „Hemmnisabbau“: H und Stufe 2 „Energiepolitik“: E



**Vorschlag sektorspezifischer Maßnahmen: Organisationen ohne Erwerbscharakter (Ausschnitt)**

Problemkreis		Stufe <sup>2)</sup>
<div style="border: 1px solid black; padding: 5px; display: inline-block;"> <ul style="list-style-type: none"> <li>● Hemmnisse vermindern</li> </ul> </div> <span style="font-size: 2em; vertical-align: middle;">→</span> <div style="border: 1px solid black; padding: 5px; display: inline-block; margin-left: 20px;"> <ul style="list-style-type: none"> <li>● sektorspezifische Maßnahmenbündel</li> </ul> </div>		
<p><b>Organisationen ohne Erwerbscharakter</b></p>		
<p>(1) mangelnde Kenntnisse und Motivation zur Energieeinsparung und -subventionen in den Verwaltungen</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>● Motivationsmaßnahmen für Leiter, Kämmerer und Hausmeister<sup>1)</sup></li> <li>● kostenlose Initialberatung<sup>1)</sup></li> </ul>	<p>H, E H, E</p>
<p>(2) mangelnde Kenntnisse bei Beratern, Maschinen- und Anlagenherstellern, Installationsgewerbe</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>● Fortbildung für Anwender, Berater, Hersteller, Installationsgewerbe<sup>1)</sup></li> <li>● Forschungsverbundvorhaben</li> </ul>	<p>H, E</p>
<p>(3) Trennung des Vermögens- und Verwaltungshaushalts, Überschuldung einiger Kommunen</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>● Aufweichung kammeralistischer Budgetplanung und Stärkung betriebswirtschaftlicher Denkweisen<sup>1)</sup></li> <li>● Finanzhilfen bei sehr rentablen Investitionen trotz Überschuldung</li> </ul>	<p>H, E E</p>
<p>(4) Investor/Nutzer-Dilemma bei Gebäuden und Anlagen</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>● Verordnungen zum Schutz der Nutzer (WSchVO, HeizanlagenVO)</li> <li>● Einführung von Energiekennzahlen für geleaste Objekte</li> </ul>	<p>H, E H, E</p>
<p>(5) Zersplitterung in den Verwaltungen</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>● Konzentration der Kompetenzen auf Energiereferat oder- Abteilung<sup>1)</sup></li> </ul>	<p>H, E</p>
<p>(6) Summe der Hemmnisse als eigenständiges Problem</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>● Aufbau einer leistungsorientierten Energie-Agentur</li> <li>● Förderung von Contracting-Unternehmen (vgl. Tab. III.2)</li> </ul>	<p>H, E H, E</p>

1) Die Initiative liegt nicht notwendigerweise bei Bund oder Ländern, sondern ist auch bei Selbstorganisationen der Wirtschaft und bei Unternehmen möglich.

2) Zuordnung zur Stufe 1 „Hemmnisabbau“: H und Stufe 2 „Energiepolitik“: E

Tabelle 6e


## Vorschlag sektorspezifischer Maßnahmen: Verkehr (Ausschnitt)

Problemkreis		Stufe <sup>2)</sup>
<ul style="list-style-type: none"> <li>● Hemmnisse vermindern</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>● sektorspezifische Maßnahmenbündel</li> </ul>	
<b>Verkehr (Ausschnitt)</b>		
(1) Kenntnismängel bei Fahrzeugkäufern und -lenkern	<ul style="list-style-type: none"> <li>● freiwillige Selbstverpflichtung der Hersteller von Kraftfahrzeugen und Flugzeugen (alternativ: Verordnungen) mit periodischer Anpassung<sup>1)</sup></li> <li>● Verordnung zum Einbau von Kraftstoffverbrauchsanzeigen in Straßenfahrzeugen</li> <li>● Fortbildung von beruflichen Fahrzeuglenkern (Lkw, Busse, Schienenfahrzeuge)<sup>1)</sup></li> </ul>	H, E  E  H, E
(2) fehlender Anreiz für hohe Besetzungsgrade in Pkw und für volle Auslastung von Lkw	<ul style="list-style-type: none"> <li>● Bevorrechtigung von Fahrgemeinschaften im Berufsverkehr</li> <li>● Umwandlung der Kilometerpauschale in Entfernungspauschale</li> <li>● Aufhebung der rechtlichen Restriktionen im Werksverkehr</li> </ul>	H, E  H, E  H, E
(3) mangelnde Internalisierung externer Kosten der Verkehrssysteme	<ul style="list-style-type: none"> <li>● Verbot der Parkkostenerstattung durch Kaufhäuser, Erhebung kostendeckender Parkgebühren</li> <li>● Internalisierung der Kosten der Flugsicherung in die Flugkosten</li> <li>● Herausnahme der Krankheits- und Unfallfolgekosten aus den Leistungen der Krankenversicherung und Übernahme durch die KFZ-Haftpflicht</li> </ul>	H, E  H, E  H, E
(4) zu langsame und wenig komfortable öffentliche Personentransportsysteme Nahverkehr	<ul style="list-style-type: none"> <li>● organisatorische Beschleunigungsmaßnahmen und Bau unabhängiger Streckenführung, Einsatz von Betriebsleitsystemen, Kleinbussen, Sammeltaxen<sup>1)</sup></li> </ul>	H, E
(5) mangelnde Kapitalverfügbarkeit der Betriebe des öffentlichen Personennahverkehrs (ÖPNV)	<ul style="list-style-type: none"> <li>● Einsatz von Mitteln aus dem Strukturhilfegesetz der Länder, Aufhebung der GVFG-Plafondierung</li> </ul>	E
(6) Siedlungsstrukturen mit getrennten Funktionen für Arbeit, Einkauf, Freizeit und Ausbildung	<ul style="list-style-type: none"> <li>● Veränderung von Siedlungskonzepten und Raumverordnungsverfahren in Richtung integraler Funktionen von Siedlungen unter Einbeziehung von Dienstleistungsbetrieben und „clean industries“</li> </ul>	E

<sup>1)</sup> Die Initiative liegt nicht notwendigerweise bei Bund oder Ländern, sondern ist auch bei Selbstorganisationen der Wirtschaft und bei Unternehmen möglich.

<sup>2)</sup> Zuordnung zur Stufe 1 „Hemmnisabbau“: H und Stufe 2 „Energiepolitik“: E

Vorschlag sektorspezifischer Maßnahmen: Umwandlungssektor (Ausschnitt)

Problemkreis		Stufe <sup>2)</sup>
<ul style="list-style-type: none"> <li>● Hemmnisse vermindern</li> </ul>		
<p><b>Umwandlungssektor</b></p> <p>(1) Kenntnismängel bei kleinen und mittleren Industriebetrieben, Stadtwerken und Regionalverteilern</p> <p>(2) Unzureichende wettbewerbliche Prozesse bei Unternehmen leitungsgebundener Energieträger</p> <p>(3) relativ hohe Anlaufverluste der Fernwärme</p> <p>(4) rechtliche Hemmnisse</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>● sektorspezifische Maßnahmenbündel</li> </ul> <ul style="list-style-type: none"> <li>● kostenlose Initialberatungen für kleine und mittlere Unternehmen<sup>1)</sup></li> <li>● Schaffung von Vorstandsressorts in Energieversorgungsunternehmen für die rationelle Energienutzung<sup>1)</sup></li> <li>● Verordnungen zur Nutzung von CH<sub>4</sub> aus Deponien, Klärwerken und Kohlegruben</li> <li>● Wärmenutzungsgebot nach BimschG</li> <li>● öffentliche Ausschreibung von zusätzlichen Stromerzeugungskapazitäten</li> <li>● Erarbeitung von Muster-Konzessionsverträgen für Gemeinden mit dem Ziel gemeinsamer Nutzung von örtlichen Energiequellen</li> <li>● Einführung des Prinzips der Minimalkostenplanung (Least Cost Planning)</li> <li>● Anforderungen an Mindestwirkungsgrade von Erzeugungsanlagen</li> <li>● Präzisierung der „vermiedenen Kosten“ bei Strom-, Gas- und Wärmeeinspeisung<sup>1)</sup></li> <li>● Genehmigung der Kooperationsverträge von Eigenerzeugern und EVU durch die Fach- und Kartellaufsicht</li> <li>● Förderung von Contracting-Unternehmen<sup>1)</sup></li> <li>● Subventionen für Fernwärmenetzneubau</li> <li>● Erweiterung der Grenze von 10 MW auf 50 MW in § 12 des 3. Verstromungsgesetzes</li> <li>● Lieferung von Eigenstrom an benachbarte Betriebe ermöglichen</li> <li>● Änderung des Mineralölsteuergesetzes</li> </ul>	<p>H, E</p> <p>H, E</p> <p>E</p> <p>H, E</p> <p>H, E</p> <p>E</p> <p>E</p> <p>H, E</p> <p>H, E</p> <p>H, E</p> <p>E</p> <p>H, E</p> <p>H, E</p> <p>H, E</p>

<sup>1)</sup> Die Initiative liegt nicht notwendigerweise bei Bund oder Ländern, sondern ist auch bei Selbstorganisationen der Wirtschaft und bei Unternehmen möglich.

<sup>2)</sup> Zuordnung zur Stufe 1 „Hemmnisabbau“: H und Stufe 2 „Energiepolitik“: E

**Ergebnisse der Untervariante „Hemmnisabbau“  
(Stufe 1)**

Der Bedarf an konventionellen Brennstoffen nimmt in den Endenergiesektoren nach Abzug der Substitutionen durch erneuerbare Energiequellen und Naturgas von 1987 bis 2005 um knapp 830 PJ ab (vgl. Tab. 7). Den größten Beitrag von 565 PJ oder 9 Prozent zu dieser Verminderung, bezogen auf den Gesamtbrennstoffverbrauch von 1987, erwartet man im Bereich der privaten Haushalte, gefolgt von dem Kleinverbrauchssektor mit knapp 90 PJ.

Während der Brennstoffbedarf, insbesondere für Steinkohle und Erdgas, in den KWK-Anlagen um 476 PJ zunimmt, vermindert er sich bei der Kondensationsstromerzeugung um insgesamt 500 PJ für die fossilen Brennstoffe. Denn obwohl die Bruttostromerzeugung zwischen 1987 und 2005 um 38 TWh, das heißt um etwa 8 Prozent zunimmt, ergeben sich erhebliche Strukturveränderungen im Einsatz von Stein- und Braunkohle infolge (vgl. Tab. 8):

– der höheren Nutzung der bestehenden Kernkraftwerke (217 PJ),

Tabelle 7

**Verbrauch an fossilen und nuklearen Brennstoffen im Jahre 1987 und 2005  
sowie direkte Emissionen in der Untervariante „Hemmnisabbau“**

Sektoren	Brennstoffe		Emissionen 2005			
	1987 PJ	2005 <sup>1)</sup> PJ	CO <sub>2</sub> (Mio. t)	CH <sub>4</sub> (1000 t)	NM VOC (1000 t)	NO <sub>x</sub> (1000 t)
<b>Endenergiesektoren</b>						
– Private Haushalte .....	1 615	1 050	64	8,2	4,2	36,2
– Kleinverbraucher .....	870	782	42	0,9	4,3	24,2
– Industrie .....	1 782	1 903	131	3,8	3,6	164,4
– Verkehr .....	1 961	1 968	147	16,7	257,4	858,4
– nicht behandelte Sektoren und statistische Differenzen .....	83	82	9	0,5	3	14,5
– Brennstoff-Substitution durch KWK .....	–0	(–300)	–20	–1,5	–1	–8,3
<b>Summe Endenergie-Sektoren .....</b>	<b>6 311</b>	<b>5 485</b>	<b>373</b>	<b>28,6</b>	<b>271,5</b>	<b>1 089,4</b>
<b>Umwandlungssektoren</b>						
Kraft-Wärme-Kopplung und Heizkraftwerke .....	499	975	71	9,1	3,1	57,4
Brennstoffe Kond.-Kraftwerke, insgesamt .....	3 165	2 903	139	0,7	1,4	97,9
– Steinkohlen .....	973	582	54	0,3	0,6	39,5
– Braunkohlen .....	784	641	72	0,3	0,6	51,9
– Heizöle .....	25	0	0	0	0	0
– Gase .....	170	230	13	0,1	0,2	6,5
– Uran .....	1 233	1 450	0	0	0	0
Eigenverbrauch sonstiger Umwandlungssektoren incl. Leitungsverluste .....	442	281	14	1 229 <sup>2)</sup>	0,2	8
<b>Summe der Emissionen<sup>4)</sup> zum Vergleich:</b>			<b>597</b>	<b>1 267<sup>3)</sup></b>	<b>276</b>	<b>1 253</b>
<b>Summe der Emissionen 1987 .....</b>			<b>715</b>	<b>1 797</b>	<b>1 530</b>	<b>2 599</b>
<b>Reduktion 1987/2005<sup>4)</sup></b>						
– absolut .....			–118	–530	–1 254	–1 346
– in % .....			– 16,5%	– 29,5%	– 82%	– 51,8%

<sup>1)</sup> nach Abzug der erneuerbaren Energiequelle, die in den Endenergiesektoren etwa 119 PJ konventionelle Energieträger substituiert.

<sup>2)</sup> 350 000 t CH<sub>4</sub> durch freiwillige Vereinbarung mit Kohlebergbau reduziert

<sup>3)</sup> nur energiebedingte Emissionen einschließlich vorgelagerter Bereiche

<sup>4)</sup> Ohne Berücksichtigung von energiebewußtem Verhalten

**Struktur der Stromerzeugung und des Brennstoffeinsatzes im Jahre 1987 und 2005  
in der Untervariante „Hemmnisabbau“**

	Stromerzeugung (TWh)		Brennstoffeinsatz (PJ)	
	1987	2005	1987	2005
Ohne KWK				
– Steinkohlen .....	106,8	63,8	973,3	581,5
– Braunkohlen .....	76,6	65,7	784,2	640,9
– Heizöle .....	2,8	0	25,5	0
– Gase .....	21,5	30,8	169,7	230,0
<b>– Summe fossiler Brennstoffe .....</b>	<b>207,7</b>	<b>160,3</b>	<b>1 952,7</b>	<b>1 452,4</b>
– Wasserkraft .....	20,6	23,6	184,0	214,2
– Kernenergie .....	130,5	160,0	1 232,7	1 450,0
– Windenergie .....	–	1,4	–	12,3
– Photovoltaik .....	–	0,1	–	0,3
Zwischensumme .....	358,8	345,3	3 369,4	3 129,2
KWK und sonstige <sup>1)</sup> .....	59,4	111,5	×	×
<b>Bruttostromerzeugung .....</b>	<b>418,3</b>	<b>456,8</b>	<b>×</b>	<b>×</b>

<sup>1)</sup> Einschließlich industrielle Eigenerzeugung (1987: 29,5 TWh)

- des Zuwachses erneuerbarer Energiequellen (Wasser: +30 PJ, Wind: +12,3 PJ) sowie
- des um 60 PJ höheren Erdgaseinsatzes.

Dadurch sinkt der Braunkohleeinsatz in Kondensationskraftwerken um 145 PJ oder 18 Prozent, während der Steinkohleeinsatz sogar um 390 PJ oder 40 Prozent auf etwa 20 Millionen Tonnen für die Kondensationsstromerzeugung zurückgeht. Der unterschiedliche Rückgang der kohlegefeuerten Kraftwerke könnte auch anders gestaltet werden. Beispielsweise könnte die Braunkohle mehr zugunsten der Steinkohle zurückgenommen werden.

Betrachtet man den Bedarf an fossilen Brennstoffen insgesamt, so setzt sich die Abnahme fossiler Brennstoffe von insgesamt 1140 PJ (oder 10,6 Prozent gegenüber 1987) wie folgt zusammen (vgl. Tab. 9):

- die Mineralölprodukte sind mit einer Abnahme von 1043 PJ (–26 Prozent) auf 3017 PJ am stärksten betroffen;
- der Verbrauch von Steinkohlen nimmt um 388 PJ oder 13,2 Millionen Tonnen (–20,7 Prozent) auf 51 Millionen Tonnen/a und der von Braunkohle um 227 PJ (–22,3 Prozent) ab;
- der Gasverbrauch steigt um 519 PJ (+21 Prozent) auf 2769 PJ. Der Erdgasbedarf beträgt nach Abzug von Raffinerie-, Gicht-, Stadt- und Grubengas sowie Flüssiggas rund 2500 PJ.

Insgesamt nimmt der Anteil der fossilen Energieträger um fünf Prozentpunkte auf 80,2 Prozent ab. Die Kernenergie hat mit 14,4 Prozent den größten Anteil bei den nicht-fossilen Energieträgern, gefolgt von der Wasserkraft mit 2,1 Prozent.

### Emissionsentwicklung

Die CO<sub>2</sub>-Emissionen nehmen insgesamt um rund 118 Millionen Tonnen, das heißt rund 16,5 Prozent gegenüber 1987 ab. Im Endenergiebereich beträgt die Reduktion 64 Millionen Tonnen CO<sub>2</sub>. Die restlichen 54 Millionen Tonnen ergeben sich durch Substitutions- und Einspareffekte im Umwandlungssektor:

- Etwa 27 Millionen Tonnen entfallen auf die bessere Auslastung der Kernenergiekraftwerke.
- Etwa 4 Millionen Tonnen entfallen auf die zusätzlichen Wind- und Wasserkraftnutzungen.
- Um rund 6 Millionen Tonnen reduzieren die übrigen Umwandlungssektoren ihre CO<sub>2</sub>-Emissionen.
- Der Rest von 17 Millionen Tonnen ist durch die verstärkte Anwendung der Kraft-Wärme-Kopplung und die Substitution unter den fossilen Brennstoffen zu kohlenstoffärmeren Energieträgern begründet (vgl. Tab. 7).

Tabelle 9

**Gesamter Energieverbrauch nach Energieträgern<sup>1)</sup> im Jahre 1987 und 2005  
im Reduktionsszenario „Energiepolitik“ mit den Untervarianten „Hemmnisabbau“ (Stufe 1)  
und „Energiepolitik“ (Stufe 2)**

Energieträger	1987		2005			
			„Hemmnisabbau“ Stufe 1		„Energiepolitik“ Stufe 2	
	PJ	%	PJ	%	PJ	%
– Steinkohlen . . . . .	1 878	17,4	1 490	14,8	1 155	12,4
– Braunkohlen . . . . .	1 016	9,4	789	7,8	617	6,6
– Mineralölprodukte . . . . .	4 060	37,6	3 017	30,0	2 552	27,5
– Gase . . . . .	2 250	20,9	2 769	27,5	2 709	29,2
<b>Summe fossiler Brennstoffe . . . . .</b>	<b>9 204</b>	<b>85,3</b>	<b>8 065</b>	<b>80,2</b>	<b>7 033</b>	<b>75,7</b>
– Wasserkraft . . . . .	184	1,7	214	2,1	220	2,4
– Kernenergie . . . . .	1 233	11,4	1 450	14,4	1 428	15,4
– Windenergie . . . . .	0	0	12	0,1	43	0,5
– Photovoltaik . . . . .	0	0	1	0,01	5	0,1
– Stromimportsaldo etc. . . . .	36	0,3	36	0,3	36	0,4
– sonstige erneuerbare Energiequellen . . . . .	135	1,3	273	2,7	523	5,6
<b>Gesamtsumme<sup>2)</sup> . . . . .</b>	<b>10 792</b>	<b>100,0</b>	<b>10 051</b>	<b>100,0</b>	<b>9 288</b>	<b>100,0</b>

1) Abweichungen vom Primärenergieverbrauch sind bedingt durch Nichtberücksichtigung des nichtenergetischen Verbrauchs, erneuerbarer Energiequellen und des internationalen Flugverkehrs

2) bewertet mit den substituierten Energieträgern, ohne Berücksichtigung von energiebewußtem Verhalten

Die CH<sub>4</sub>-Emissionen in den Endenergiesektoren nehmen gegenüber 1987 von rund 135 000 auf 29 000 Tonnen erheblich ab. Diese sind bei den Straßenfahrzeugen auf den Katalysator und im Bereich der privaten Haushalte auf die geringere Verwendung von Steinkohle und Briketts zurückzuführen. Weiterhin wird unterstellt, daß ein Teil der CH<sub>4</sub>-Emissionen aus den Kohlebergbaugruben mit Blockheizkraftwerke oder durch Beimischung zur Verbrennungsluft verbrannt wird, so daß hier die Emissionen um knapp 30 Prozent auf 1,27 Millionen Tonnen gesenkt werden können.

Im Verkehrsbereich reduzieren sich auch die NO<sub>x</sub>- und NMVOC-Emissionen wegen des Katalysatoreinsatzes um mehr als 50 Prozent (bei NO<sub>x</sub> auf 858 000 Tonnen und bei NMVOC auf 257 000 Tonnen). Da diese Emissionen in den anderen Endenergieverbrauchsbereichen relativ gering sind, bestimmen die Umweltschutzaufgaben für Straßenfahrzeuge und Flugzeuge sowie für fossil gefeuerte Großkesselanlagen weitgehend die Emissionsentwicklung dieser Schadstoffe.

### 1.2.2 Stufe 2: „Energiepolitik“

Wie in Kapitel 4 Nr. 2.3 und in Studienkomplex F des Studienprogramms ausgeführt, sind einzelne energiepolitische Maßnahmen nicht unabhängig voneinan-

der in ihrer Wirkung zu beurteilen. In vielen Fällen sind finanzielle oder pretiale Maßnahmen wichtige Instrumente, um eine Energie- und Klimapolitik zu gestalten, die erfolgreich bestehende Hemmnisse für eine weitergehende CO<sub>2</sub>-Reduktion beseitigt. Außerdem ist nicht auszuschließen, daß sich die Preise auf den Weltmärkten anders entwickeln, als sie in Kapitel 4, Tabelle 1 unterstellt wurden. Deshalb wurde in dieser zweiten Stufe des Reduktionsszenarios eine Steuer- oder Abgabenslösung oder eine Energiepreissteigerung unterstellt, die in ihrer Wirkung die Endenergieträger, und zwar die Brennstoffe um 5 DM/GJ und den Strom um 2 DPf/kWh, verteuern (Begründung dieser Höhe vgl. Kap. 4 Nr. 2.3).

Zusätzlich zu den eingangs genannten Vorgaben sind weitere Annahmen für diese zweite Stufe zu nennen:

– Infolge der veränderten Preise und dadurch günstigeren Rahmenbedingungen zum Abbau bestehender Hemmnisse wird der Spielraum für die rationelle Energieverwendung automatisch größer. Mit den Energiebedarfsdaten der „Energiepolitik“-Variante des Kap. 4 Nr. 2.3. wird deshalb die Bedarfsentwicklung dieses Reduktionsszenarios „Energiepolitik“ beschrieben (vgl. Tab. 10):

- im Raumwärmesektor der privaten Haushalte reduziert sich der Energiebedarf um knapp 610 PJ, das heißt um 38 Prozent, bezogen auf 1987.

Der Energiebedarf bei den Elektrogeräten reduziert sich um 33 PJ und der Energiebedarf zur Warmwassererzeugung um 46 PJ, das heißt um 13 Prozent beziehungsweise 24 Prozent.

- Trotz des Wirtschaftswachstums des Kleinverbrauchssektors um gut 50 Prozent vermindert sich der Endenergiebedarf um 155 PJ (-12,7 Prozent).
- Rationelle Energienutzung und strukturelle Änderungen können den wachstumsbedingten Anstieg des industriellen Energieverbrauchs

nicht völlig kompensieren, der bis 2005 noch um 180 PJ (etwa 8 Prozent) zunimmt.

- Durch die erheblichen Verschiebungen der Verkehrsträger und die 10-Prozentige Reduktion an Personenverkehrsleistungen gelingt es, das ständige Wachstum des Energieverbrauchs des Verkehrs zu bremsen und den Verbrauch um 210 PJ (-10,5 Prozent) zu vermindern.

Insgesamt reduziert sich die Energienachfrage in den Endenergiesektoren um rund 870 PJ, das heißt um 11,4 Prozent gegenüber 1987 (vgl. Tab. 10).

Tabelle 10

**Zusammenstellung der emissionsmindernden Maßnahmen für das Reduktionsszenario „Energiepolitik“ in Petajoule (PJ)**

Sektoren	Energieverbrauch 1987	Änderungen 1987/2005 durch			Resultierender Energiebedarf <sup>8)</sup> 2005
		rationelle Energieverwendung und Wachstum	erneuerbare Energiequellen <sup>2)</sup>	Substitution fossiler Energie <sup>6)</sup>	
private Haushalte .....	2 034 <sup>1)</sup>	-684	-149	- 4	1 197
Kleinverbrauch .....	1 225	-155	-140	- 4	926
Industrie .....	2 289 <sup>3)</sup>	+181	- 21	- 7	2 442
Verkehr <sup>4)</sup> .....	1 991	-210	-	-	1 781
nicht behandelt <sup>5)</sup> .....	123	- 3	-	-	120
<b>Summe Endenergie</b> .....	<b>7 662</b>	<b>-871</b>	<b>-310</b>	<b>- 15</b>	<b>6 466</b>
davon:					
- Steinkohle .....	649	- 44	- 5	- 73	527
- Braunkohle .....	169	- 51	- 6	- 30	82
- Benzin .....	1 066	-387	-	-	679
- HEL .....	2 550	-301	-205	-238	1 806
- HS .....	297	- 10	- 6	-118	162
- Gase .....	1 581	-108	- 57	+444	1 860
- Fernwärme <sup>9)</sup> .....	195	- 34	-	-	161
- Strom .....	1 156	+ 63	- 31	-	1 188
<b>Kraft-Wärme-Kopplung</b>					
- Industrie .....	245	198		- 7	436
- Heizkraftwerke .....	254	285	-110 <sup>7)</sup>	k.A.	539
<b>Summe KWK</b> .....	<b>499</b>	<b>483</b>		<b>- 7</b>	<b>975</b>

1) Raumwärme temperaturbereinigt auf Normaljahr

2) durch erneuerbare Energiequellen substituierte Brennstoffmengen

3) Inklusive Brennstoffe für eigenerzeugten und selbstverbrauchten Strom

4) Inklusive Treibstoffe für internationalen Flugverkehr (1987: 120 PJ)

5) dezentrale Warmwasserversorgung mit Holz und Gas, Kraft und Treibstoffe für Militär und Landwirtschaft, Strom für Wärme im Verkehr, sonstiger Strom von Kleingeräten im Haushalt

6) Minderverbrauch (netto) durch verstärkten Erdgaseinsatz

7) substituierte Brennstoffe in Endenergiesektoren und breitgestellter Strom aus biomassegefeuerter KWK; in Summe nicht berücksichtigt

8) konventionelle Energieträger

9) Fernwärme ohne zusätzliche Fern- und Nahwärmebereitstellung aus Kraft-Wärme-Kopplung

- Die Nutzung der Kraft-Wärme-Kopplung mittels fossiler Energieträger in der Industrie und in Heizkraftwerken entwickelt sich wie in der Untervariante „Hemmnisabbau“.
- Auf Seiten der erneuerbaren Energiequellen werden in den Endenergiesektoren durch Solar-Kollektoren, Biomasse und Wärmepumpen 310 PJ Endenergie substituiert. Die größten Potentiale liegen mit 140 PJ im Kleinverbrauchssektor und mit 109 PJ im Raumwärmesektor der privaten Haushalte. Weitere 74 PJ Endenergieträger werden durch stroh- und biogasgefeuerte Heizkraftwerke und Blockheizkraftwerke substituiert sowie 10 TWh als Strom bereitgestellt. Der Ausbau der Wasserkraft wird mit 4 TWh, der Windkraft mit 4,8 TWh und der Photovoltaik mit 0,5 TWh veranschlagt (vgl. Tab. 12).
- Für den Umwandlungssektor wurde folgendes angenommen:
  - Die Raffinerien verbessern ihre Umwandlungseffizienz um 15 Prozent bis 2005.
  - Die Umwandlungswirkungsgrade von Steinkohle- und Braunkohle-Kondensationskraftwerken verbessern sich um durchschnittlich 4 Prozent und die von Gaskondensationskraftwerken um 9 Prozent.

### Ergebnisse der Untervariante „Energiepolitik“

Der Bedarf an konventionellen Brennstoffen nimmt in den Endenergiesektoren nach Abzug der Substitutionen durch erneuerbare Energiequellen und Naturgas bis 2005 um rund 1500 PJ oder 23,8 Prozent ab (vgl. Tab. 12). Den größten Beitrag von 740 PJ oder 11,8 Prozent zu dieser Verminderung erwartet man im Bereich der privaten Haushalte, gefolgt von dem Kleinverbrauchssektor mit 265 PJ.

Während der Brennstoffbedarf, insbesondere für Steinkohle und Erdgas, in den KWK-Anlagen um 476 PJ zunimmt, vermindert er sich bei der Kondensationsstromerzeugung um insgesamt 950 PJ für Stein- und Braunkohle, wobei das Erdgas um 95 PJ zulegt (vgl. Tab. 11). Der große Rückgang bei der Braunkohle- und Steinkohleverstromung ist auf folgende Gründe zurückzuführen: bei praktisch gleichbleibender Bruttostromerzeugung von 420 TWh

- werden 195 PJ fossile Energieträger durch Kernenergie substituiert,
- erhöht sich der Substitutionsbeitrag der erneuerbaren Energiequellen um 83,5 PJ (Wasser: 36 PJ; Windkraft: 43 PJ und Photovoltaik: 4,5 PJ) und
- erhöht sich die Stromerzeugung mittels – meist gasgefeuerter – Kraft-Wärme-Kopplung um 54,3 TWh.

Tabelle 11

### Struktur der Stromerzeugung und des Brennstoffeinsatzes im Jahre 1987 und 2005 im Reduktionsszenario „Energiepolitik“

	Stromerzeugung (TWh)		Brennstoffeinsatz (PJ)	
	1987	2005	1987	2005
<b>Ohne KWK</b>				
– Steinkohlen .....	106,8	31,3	973,3	258,1
– Braunkohlen .....	76,6	50,1	784,2	481,3
– Heizöle .....	2,8	0	25,5	0
– Gase .....	21,5	36,4	169,7	264,8
<b>– Summe fossiler Brennstoffe .....</b>	<b>207,7</b>	<b>117,8</b>	<b>1 952,7</b>	<b>1 004,2</b>
– Wasserkraft .....	20,6	24,6	184,0	219,9
– Kernenergie .....	130,5	160,0	1 232,7	1 427,8
– Windenergie .....	–	4,8	–	42,6
– Photovoltaik .....	–	0,5	–	4,5
<b>Zwischensumme .....</b>	<b>358,8</b>	<b>307,7</b>	<b>3 369,4</b>	<b>2 699,0</b>
<b>KWK und sonstige<sup>1)</sup> .....</b>	<b>59,4</b>	<b>113,7</b>	<b>×</b>	<b>×</b>
<b>Bruttostromerzeugung .....</b>	<b>418,3</b>	<b>421,2</b>	<b>×</b>	<b>×</b>

<sup>1)</sup> Einschließlich industrielle Eigenerzeugung (1987: 29,5 TWh)



**Verbrauch an fossilen und nuklearen Brennstoffen im Jahre 1987 und 2005  
sowie direkte Emissionen im Reduktionsszenario „Energiepolitik“**

Sektoren	Brennstoffe		Emissionen 2005			
	1987 PJ	2005 <sup>1)</sup> PJ	CO <sub>2</sub> (Mio. t)	CH <sub>4</sub> (1000 t)	NMVOG (1000 t)	NO <sub>x</sub> (1000 t)
<b>Endenergiesektoren</b>						
– Private Haushalte .....	1 615	873	52	6,4	3,1	29,7
– Kleinverbraucher .....	870	605	36	0,8	4,0	20,5
– Industrie .....	1 782	1 833	127	3,7	4,0	159,2
– Verkehr .....	1 961	1 732	129	14,6	226,7	763,3
– nicht behandelte Sektoren und statistische Differenzen .....	83	74	9	0,4	2,7	13,0
– Brennstoff-Substitution durch KWK .....	0	-309	-20	-1,5	-1,1	-15,8
<b>Summe Endenergie-Sektoren .....</b>	<b>6 311</b>	<b>4 808</b>	<b>333</b>	<b>24,4</b>	<b>239,4</b>	<b>1 027,3</b>
<b>Umwandlungssektoren</b>						
Kraft-Wärme-Kopplung und Heizkraftwerke .....	499	975	71	9,1	3,1	57
Brennstoffe Kond.-Kraftwerke, insgesamt .....	3 165	2 432	94	0,5	1,1	67
– Steinkohlen .....	973	258	25	0,1	0,3	19
– Braunkohlen .....	784	481	54	0,2	0,5	40
– Heizöle .....	25	0	0	0,0	0,0	0
– Gase .....	170	265	15	0,1	0,3	8
– Uran .....	1 233	1 428	0	0,0	0,0	0
Eigenverbrauch sonstiger Umwandlungssektoren incl. Leitungsverluste .....	442	281	12	961 <sup>2)</sup>	0,2	6
<b>Summe der Emissionen zum Vergleich:</b>			<b>510</b>	<b>995<sup>3)</sup></b>	<b>244</b>	<b>1 157</b>
<b>Summe der Emissionen 1987 .....</b>			<b>715</b>	<b>1 797</b>	<b>1 530</b>	<b>2 599</b>
<b>Reduktion 1987/2005<sup>4)</sup></b>						
– <b>absolut</b> .....			<b>-205</b>	<b>-632</b>	<b>-1 289</b>	<b>-1 442</b>
– <b>in %</b> .....			<b>- 28,7</b>	<b>- 35,2</b>	<b>- 84,2</b>	<b>- 55,5</b>

1) nach Abzug der erneuerbaren etwa 119 PJ konventionelle Energieträger substituieren

2) 350 000 t CH<sub>4</sub> durch freiwillige Vereinbarung mit Kohlebergbau reduziert

3) nur energiebedingte Emissionen einschließlich vorgelagerter Bereiche

4) Ohne Berücksichtigung von energiebewußtem Verhalten

Dadurch sinkt der Braunkohleeinsatz in Kondensationskraftwerken um gut 300 PJ (oder 31 Prozent) und der Steinkohleeinsatz um 715 PJ (oder 73 Prozent) auf 258 PJ (das heißt auf 9 Millionen Tonnen).

Betrachtet man den Bedarf an fossilen Brennstoffen insgesamt, so reduzieren sich die benötigten Mengen um 2170 PJ (minus 23,6 Prozent), wesentliche Veränderungen sind folgende (vgl. Tab. 9):

– Die Mineralölprodukte sind mit einer Abnahme von 1508 PJ (-37 Prozent) auf 2550 PJ am stärksten betroffen; ihr Anteil am Gesamtenergieverbrauch liegt gleichauf mit dem Naturgas.

– Der Gasverbrauch nimmt mit 460 PJ (20 Prozent) etwas weniger als beim „Hemmnisabbau“-Szenario zu. Der Erdgasbedarf beträgt nach Abzug von Raffinerie-, Gicht-, Stadt- und Grubengas sowie Flüssiggas rund 2450 PJ;

– während der Bedarf für Braunkohlen um 400 PJ (39 Prozent) zurückgeht, sinkt der Steinkohlenbedarf noch etwas deutlicher um 720 PJ (38,5 Prozent) auf rund 1155 PJ oder knapp 40 Millionen Tonnen.

Insgesamt nimmt der Anteil der fossilen Energieträger am gesamten Energieverbrauch von 85,3 Prozent im

Jahre 1987 auf rund 77,8 Prozent im Jahre 2005 ab. Dieser gegenüber dem „Hemmnisabbau“-Szenario weitere Rückgang um 2,5 Prozentpunkte ist auf eine verstärkte Nutzung erneuerbarer Energiequellen, das heißt von Kleinwasserkraftwerken, Windkonvertern und Photovoltaikanlagen bei der Stromerzeugung zurückzuführen (vgl. Tab. 9).

### Emissionsentwicklung

Die CO<sub>2</sub>-Emissionen nehmen insgesamt um rund 205 Millionen Tonnen, das heißt rund 28,7 Prozent gegenüber 1987 ab. Im Endenergiebereich beträgt die Reduktion 104 Millionen Tonnen CO<sub>2</sub>. Die restlichen rund 100 Millionen Tonnen ergeben sich durch Substitutions- und Einspareffekte im Umwandlungssektor (vgl. Tab. 12):

- Etwa 27 Millionen Tonnen entfallen auf die bessere Auslastung der Kernkraftwerke.
- Etwa 8 Millionen Tonnen CO<sub>2</sub> entfallen auf die zusätzlichen Wind- und Wasserkraftnutzungen.
- Um rund 8,6 Millionen Tonnen reduzieren die übrigen Umwandlungssektoren ihre CO<sub>2</sub>-Emissionen.
- Der Rest von rund 55 Millionen Tonnen CO<sub>2</sub> ist durch die verringerte Stromnachfrage, verstärkte KWK-Anwendung und die dadurch bedingte geringere Kondensationsstromerzeugung auf Basis fossiler Energieträger begründet.

Unterstellt man, daß in diesem Reduktionsszenario die Bevölkerung und die Politik nicht nur auf die technischen Möglichkeiten der Emissionsminderung zurückgreifen werden, sondern auch durch ein energiebewußteres Verhalten und freiwilligen Verzicht auf möglichen energieintensiven Konsum bestehende Minderungsmöglichkeiten der klimarelevanten Schadstoffe eröffnen werden, so wäre eine weitere Reduktion von CO<sub>2</sub>-Emissionen um vielleicht 5 Prozent denkbar (vgl. Kap. 4 Nr. 2.7) In diesem Reduktionsszenario ergibt sich somit ein CO<sub>2</sub>-Minderungspotential bis 2005 von etwa einem Drittel der Emissionen von 1987.

Die CH<sub>4</sub>-Emissionen in den Endenergiesektoren nehmen gegenüber 1987 von rund 100 000 auf 25 000 Tonnen, ähnlich wie im Hemmnisabbau-Szenario, ab. In allen Szenarien wird unterstellt, daß im Kohlebergbau eine Methangasmenge von 350 000 Tonnen, die leicht erfassbar ist und auch aus Sicherheitsgründen herausgeholt werden sollte, energetisch genutzt wird. Zusätzlich resultiert aus einem verminderten Kohlebeziehungswise Mineralölbedarf eine Reduzierung der CH<sub>4</sub>-Emissionen in Höhe von 148 000 Tonnen beziehungsweise 84 000 CH<sub>4</sub>. Der steigende Erdgasverbrauch führt zu einer Mehremission von etwa 25 000 Tonnen, wobei angenommen wurde, daß die Erdgasmehrverbräuche infolge verbesserter Leitungsnetze nur zu halb so hohen zusätzlichen Methanemissionen führen.

Ganz hervorragend schneiden die Emissionsminderungen von flüchtigen organischen Verbindungen

(ohne Methan) und Stickoxiden ab; dies ist aber im wesentlichen auf die bereits laufenden Regelungen des Umweltschutzes (zum Beispiel Großfeuerungsanlagen-Verordnung, Katalysatoreinbau in PKW) zurückzuführen.

### 1.2.3 Kosten der Emissionsminderungsmaßnahmen im Reduktionsszenario „Energiepolitik“

Die Kosten der beiden Stufen des Reduktionsszenarios „Energiepolitik“ sind wegen mangelnder Angaben in den Einzelstudien nicht vollständig anzugeben. Die verfügbaren Angaben wurden einmal als erforderliche Investitionen für den Zeitraum 1987 bis 2005 genannt (vgl. Kap. 4, Nr. 2 bis 7), zum zweiten als jährliche Nettokosten ausgewiesen (vgl. Tab. 13). Diese Nettokosten sind die Differenz zwischen den gesamten Zusatzkosten (der Kapital-, Personal-, Wartungs- und sonstigen Kosten) und den eingesparten Energiekosten. Zum Verständnis der Zahlenangaben sei betont, daß die Kapitalkosten annuitätisch für die Nutzungszeit berechnet wurden (zum Beispiel Gebäude, Fernwärme für 35 Jahre; Heizkraftwerke: 25 Jahre und Kessel sowie industrielle Kraft-Wärme-Kopplung: 15 Jahre). Für die Berechnung der eingesparten Energiekosten wurden mittlere Energiepreise ohne Preispolitik in dem jeweils betroffenen Sektor und der betroffenen Nutzungszeit herangezogen (vgl. Kap. 4, Tab. 1). Das heißt, auch für die „Energiepolitik“-Variante, für die preispolitische Maßnahmen unterstellt sind, wurden die gleichen Energiepreise verwendet, wie für den Hemmnisabbau, um für beide Varianten den gleichen Bezugsmaßstab zur Verfügung zu haben. Höhere Nettokosten der „Energiepolitik“-Variante gegenüber der „Hemmnisabbau“-Variante signalisieren somit adäquat die zusätzlichen Kosten im Lichte des zusätzlichen Nutzens weiterer Emissionsminderungen. Bei höheren Energiepreisen (beispielsweise bei einer 15prozentigen Energiepreiserhöhung entsprechend dem Referenz-Szenario, vgl. Nr. 1.1) würden weitere Maßnahmen zur rationellen Energienutzung rentabel.

Insgesamt ergibt sich in der Untervariante „Hemmnisabbau“ in der Summe ein negatives Vorzeichen der jährlichen Nettokosten, das heißt, die zwischen den Jahren 1987 bis 2005 getätigten Investitionen von insgesamt 160 Milliarden DM würden sich – über alles gerechnet – rentieren. Die Werte zeigen auch, daß die in der Energiepolitik-Variante genannten zusätzlichen Maßnahmen an Rentabilität merklich einbüßen, weil die Grenzkosten der zusätzlichen Maßnahmen steigen, die Preise zur Bewertung der eingesparten Energiemengen aber aus Gründen der analytischen Klarheit auf dem Niveau des Hemmnisabbau-Szenarios konstant gehalten wurden. Würden die Preise zur Bewertung der eingesparten Energiemengen des Energiepolitik-Szenarios von dem als höher unterstellten Preispfad der Energiepolitik-Variante ausgehen, so wären in weiteren Fällen die Reduktionsmaßnahmen als rentabel zu bezeichnen. Auf einige Einzelpunkte sei im folgenden hingewiesen:

- Im Bereich der rationellen Energieverwendung wurde das Investitionsvolumen auf 135 Milliarden DM (Hemmnisabbau) und 224 Milliarden DM

(Energiepolitik) beziffert. Bei den Investitionsangaben wurde in folgenden Punkten von den Angaben der Einzelstudien abgewichen (vgl. Kap. 4, Tab. 4):

- Die Investitionskosten der Altbau-Wärmedämmung wurden um 25 bis 30 Prozent erhöht. Es wurde unterstellt, daß in beiden Stufen zwei Drittel des zur Sanierung anstehenden Altbaubestandes um durchschnittlich 34 Prozent (Hemmnisabbau) oder 42 Prozent (Energiepolitik) wärmetechnisch verbessert werden. Weiterhin wurden Investitionen für die Fenstererneuerung und die Wärmedämmung von Innenwänden im nicht-sanierten Bestand, ein völlig neuer Bestand an Wärmeerzeugern, und zusätzliche Aufwendungen im Neubau unterstellt (im Neubau 60, – DM/m<sup>2</sup> (Hemmnisabbau) und 180, – bis 200, – DM/m<sup>2</sup> (Energiepolitik)).
- Im Elektrogerätebereich und bei den Energiesparleuchten sind die erreichbaren Stromeinsparungen selbst bei heutigen Strompreisen sehr rentabel. Bei einigen Geräten sind die Zusatzinvestitionen Null gegenüber dem Durchschnittspreis aller Neugeräte. Bei den Energiesparleuchten (Leistung 8 – 18 W) wurden Investitionen von 10, – DM für die austauschbare Leuchte einschließlich anteiliger Kosten für das Vorschaltgerät unterstellt.
- Für die gewerblichen Bereiche im Kleinverbrauch und für die Industrie lassen sich nur „anlegbare Investitionskosten“ ermitteln, wie dies im Gesamtbericht von A.1 (vgl. Kap. 6) versucht wurde. Diese anlegbaren Kosten sind für technologisch sehr heterogene Energieverbrauchsgebiete die einzig gangbare Methode, um über die eingesparten Energiemengen, Energiepreise und übliche Kapitalrückflußzeiten zu Investitionswerten zu kommen. Allerdings sind diese Werte sehr unsicher und in der Tendenz überhöht, weil autonome Energieeffizienzverbesserungen bei dieser Methode fälschlicherweise als preisinduziert interpretiert werden. Deshalb wurde auf die Angabe dieser Werte in Tabelle 13 verzichtet.
- Während die negativen Werte der jährlichen Nettokosten im Raumwärmebereich der privaten Haushalte mit 267 Millionen DM als zusätzliche Erträge zu interpretieren sind, wurden in der „Energiepolitik“-Variante infolge der verstärkten Wärmedämmmaßnahmen im Alt- und Neubau Zusatzkosten in Höhe von 1,9 Milliarden DM/a ermittelt.
- Da für die Elektrogeräte lediglich der Abbau von Hemmnissen bei bereits heute gegebener Rentabilität unterstellt wurde, unterscheiden sich die Ergebnisse in den beiden Untervarianten nicht.
- Die Wirtschaftlichkeit der erneuerbaren Energiequellen ist bis auf einzelne Ausnahmen noch nicht gegeben. Allerdings werden die Zusatzkosten von 524 Millionen DM beim „Hemmnisabbau“ durch Einsparungen im Bereich der rationellen Energieverwendung weitaus kompensiert.

– Verständlicherweise sind Substitutionsprozesse zwischen den Energieträgern (Naturgas und andere fossile Energieträger) in Kesselanlagen, Prozessen und Kraftwerken häufig wirtschaftlich attraktiv. Die Substitutionen im Industriebereich sind mit Zusatzkosten verbunden, weil stets bei der Substitution von Steinkohle mit dem Preis von Importkohle gerechnet wurde.

Insgesamt errechnet sich für die Zeit 1987 bis 2005 ein Investitionsvolumen von 160 Milliarden DM in der „Hemmnisabbau-Variante“ und von 325 Milliarden DM in der „Energiepolitik-Variante“, das heißt von jährlich im Mittel 8,7 Milliarden DM beziehungsweise 18 Milliarden DM. Die jährlichen Nettokosten im Jahr 2005 belaufen sich auf rund minus 1,9 Milliarden DM für das „Hemmnisabbau“-Szenario und 2,8 Milliarden DM für die Energiepolitik-Variante, wobei – dies sei nochmals betont – die Einsparung konventioneller Energieträger in beiden Varianten mit der „moderaten“ Preisentwicklung (vgl. Tab. 1) bewertet wurde.

In der „Hemmnisabbau“-Variante sinkt die pro Kopf CO<sub>2</sub>-Emission von 11,7 Tonnen CO<sub>2</sub>/pro Kopf in 1987 auf 10 Tonnen CO<sub>2</sub>/pro Kopf im Jahr 2005. Diese Reduktion um 16 Prozent wäre im Durchschnitt mit einer Kostenreduktion zu erreichen. Denn der negative Wert der Nettokosten von fast 2,0 Milliarden DM führt rein rechnerisch bei einer Verminderung von 74 Millionen Tonnen CO<sub>2</sub> in den betroffenen Sektoren zu einer Kostenersparnis von fast 27, – DM je verminderter Tonne CO<sub>2</sub>. Infolge der weitergehenden Maßnahmen zur rationellen Energieverwendung und Anwendung erneuerbarer Energiequellen in der „Energiepolitik“-Variante kommt es zu positiven Werten der Nettokosten von insgesamt 2,73 Milliarden DM/a, denen eine Reduktion von 103 Millionen Tonnen CO<sub>2</sub> als „Ertrag“ gegenübersteht. Die „Energiepolitik“-Variante führt somit zu einer pro Kopf CO<sub>2</sub>-Emission von 8,5 Tonnen CO<sub>2</sub>/pro Kopf in 2005 (insgesamt minus 28,7 Prozent gegenüber 1987) und jährlichen Nettokosten von 26,50 DM je Tonne reduziertes CO<sub>2</sub>.

Zusammen mit den nicht kostenmäßig erfaßten Sektoren (Warmwasser, Industrie und prozeßwärmeintensive Bereiche des Kleinverbrauchs sowie Verkehr) dürften die Nettokosten der Energiepolitik-Variante insgesamt jährlich bei gut 5 Milliarden DM liegen, d. h. unter 100, – DM pro Kopf im Jahre 2005 (zum Vergleich: das Bruttoinlandsprodukt pro Kopf liegt im Jahr 2005 nach den zugrunde gelegten Annahmen um 17 800 DM/pro Kopf höher als 1987).

Eine weitere Reduktion der pro Kopf-Emissionen auf 8 Tonnen CO<sub>2</sub> erscheint nicht ausgeschlossen, wenn man eine Verminderung der Energiedienstleistungen um 4,5 Prozent unterstellt, was die untere Grenze einer groben Abschätzung darstellt (vgl. Kap. 4, Nr. 2.7). Ob diese Reduktion durch Einsicht der Bevölkerung in die Bedrohtheit des globalen Klimas und seiner Folgewirkungen erreicht wird, läßt sich heute nicht eindeutig beantworten.

#### Fazit

Insgesamt läßt sich feststellen, daß bei den vorgenannten Rahmenannahmen und der angenommenen Komposition der technischen Maßnahmen des Reduk-

Tabelle 13

**Investitionssummen im Zeitraum von 1987 bis 2005 und jährliche Nettokosten der Untervarianten „Hemmnisabbau“ und „Energiepolitik“ (soweit verfügbar)**

Maßnahme/Sektor	Stufe 1 „Hemmnisabbau“ (ohne Preispolitik)		Stufe 2 „Energiepolitik“ (mit Preispolitik)	
	Invest.-Kosten Mrd. DM	jährliche Nettokosten <sup>1)</sup> (in 2005) Mio. DM/a	Invest.-Kosten Mrd. DM	jährliche Nettokosten <sup>1)</sup> (in 2005) Mio. DM/a
<b>rationelle Energieverwendung</b>				
– private Haushalte				
○ Raumwärme .....	80,0	– 267	164,0	+1 874
○ Elektrogeräte .....	2,6	–1 937	2,6	–1 937
– Kleinverbrauch:				
○ „Bereich 2“ <sup>2)</sup> .....	8,5	– 160	14,2	– 118
○ „Bereich 1“ .....	in der Regel bereits unter heutigen Energiepreisen rentable, aber gehemmte Potentiale			
– Industrie				
– KWK, Heizkraftwerke und Fernwärme .....	42,4	– 420	42,4	– 420
– Raffinerien .....	1,1	– 67	0,93	– 56
Zwischensumme .....	134,6	–2 851	224,1	– 657
<b>Erneuerbare Energiequellen</b>				
– Thermische Kollektoren in HH und KV .....	2,21	– 101	18,9	+ 413
– regenerative Nahwärme .....	2,43	– 179	12,2	– 75
– Wärmepumpen .....	11,20	+ 804	48,1	+2 709
Zwischensumme .....	15,88	+ 524	79,2	+3 047
		Stromerzeugungs- kosten		Stromerzeugungs- kosten
– Wasserkraft .....	5,60	0,103 DM/kWh	8,1	0,105 DM/kWh
– Windkonverter .....	1,26	0,103 DM/kWh	4,6	0,107 DM/kWh
– Biomasse .....	2,27	0,140 DM/kWh	3,7	0,150 DM/kWh
– PV .....	0,41	0,910 DM/kWh	4,2	0,520 DM/kWh
Zwischensumme .....	9,5	0,129 DM/kWh	20,7	0,139 DM/kWh
<b>Substitution durch Erdgas</b>				
– private Haushalte .....	k.A.	– 33,2 <sup>3)</sup>	k.A.	– 33,2 <sup>3)</sup>
– Kleinverbrauch .....	k.A.	– 47,1 <sup>3)</sup>	k.A.	– 47,1 <sup>3)</sup>
– Industrie .....	k.A.	+ 580,0 <sup>3)</sup>	k.A.	+ 580,0 <sup>3)</sup>
Substitution durch höhere Auslastung von Kernkraftwerken (82%) .....	k.A.	– 163,3 <sup>3)</sup>	k.A.	– 163,3 <sup>3)</sup>
Zwischensumme .....	k.A.	+ 336,4	k.A.	+ 336,4
<b>Gesamtsumme</b> .....	160 <sup>4)</sup>	–1 991	324 <sup>4)</sup>	2 726
– pro-Kopf-Betrag .....	2 660,— DM/cap	–33,— DM/cap	5 400,— DM/cap	+45,50 DM/cap
– pro vermiedene t CO <sub>2</sub> .....		–26,90 DM/t CO <sub>2</sub>		+26,50 DM/t CO <sub>2</sub>

<sup>1)</sup> Kapital-, Personal-, Wartungs- und sonstige Kosten abzüglich eingesparter Energiekosten bei Preisentwicklung ohne zusätzliche Steuern oder Abgaben. Energiepreise in beiden Stufen entsprechen der Referenzentwicklung in Tab. 3.1-1.

<sup>2)</sup> Raumwärmeintensive Bereiche

<sup>3)</sup> Die Substitution von Steinkohle wurde mit dem Kohleimportpreis berechnet.

<sup>4)</sup> ohne Investitionen zur Substitution kohlenstoffreicher Energieträger.

tionsszenarios eine Verminderung der CO<sub>2</sub>-Emissionen um etwa 30 Prozent realisierbar wäre, wenn die Energie- und Verkehrspolitik in dem skizzierten erheblichen Umfang die bestehenden Möglichkeiten aufgreifen würde. Die Kosten würden sich im Jahre 2005 allenfalls auf 100,— DM pro Kopf belaufen, ein angesichts der Zunahme des Bruttoinlandsprodukts pro Kopf um 17 800 DM/cap im gleichen Zeitraum vergleichsweise geringer Betrag, um die Entkopplung von Wirtschaftswachstum und klimarelevanten Emissionen in dem erforderlichen Umfang zu realisieren.

Selbst wenn die Transaktionskosten, die in die Schätzungen der Investitions- und Betriebskosten nicht mit einbezogen wurden, weitere rund 100,— DM pro Kopf ausmachen würden, so lägen die Nettokosten (einschließlich der Transaktionskosten) in der Höhe von 12 Milliarden DM pro Jahr oder bei 55,— DM je vermiedener Tonne CO<sub>2</sub> (zum Vergleich: Die jährlichen Ausgaben für Tabakwaren betragen in der Bundesrepublik Deutschland (ohne ehemalige DDR) 24 Milliarden DM, und die für Alkoholika 37 Milliarden DM).

### 1.3 Reduktionsszenario „Ausstieg aus der Kernenergie“<sup>1)</sup>

Bei Realisierung des zuvor beschriebenen Reduktionsszenarios „Energiepolitik“ sollte es — noch ohne Berücksichtigung möglicher Verminderungen von Energiedienstleistungen — bis zum Jahre 2005 möglich sein, die CO<sub>2</sub>-Emissionen in der Bundesrepublik Deutschland im Vergleich zu 1987 um rund 30 Prozent zu reduzieren.

Um eine alleinige Fixierung auf das Ziel einer Minderung von CO<sub>2</sub>-Emissionen zu vermeiden, wodurch die Risiken einer nuklearen Energieversorgungsstrategie überdeckt werden könnten, waren aber auch die emissionsseitigen Implikationen unter der Voraussetzung eines bis spätestens 2005 zu vollziehenden Ausstiegs aus der Kernenergie zu untersuchen. Dabei sollte nun — um zu einer unmittelbaren Vergleichbarkeit hinsichtlich der dann zu treffenden Maßnahmen zu kommen — ein Szenario beschrieben werden, das im Resultat zu derselben Reduktion der CO<sub>2</sub>-Emissionen führt wie in der „Energiepolitik“-Variante des Reduktionsszenarios. Außerdem sollten entsprechende qualitative Hinweise auf einen bereits bis 1995 zu verwirklichenden Ausstieg gegeben werden. Für einen Ausstieg aus der Kernenergie wird eine Reihe von Gründen angeführt, deren Berechtigung zwischen den Koordinatoren umstritten ist. Daher wurde an dieser Stelle auf eine ausführliche Darlegung verzichtet. Für Einzelheiten sei auf den zusammenfassenden Bericht zum Studienkomplex A.4 verwiesen.

#### 1.3.1 Komposition und Annahmen zum Ausstieg aus der Kernenergie bis zum Jahr 2005

Die Umsetzung des Reduktionsszenarios erfordert erhebliche energiepolitische Anstrengungen. Will man

<sup>1)</sup> Dieser Teil wurde im Rahmen der zusammenfassenden Energiestudie (vgl. Kapitel 6) von Dr. Ziesing federführend bearbeitet.

die Reduktion der CO<sub>2</sub>-Emissionen auf größenordnungsmäßig 510 Millionen Tonnen mit einer Beendigung der Nutzung der Kernenergie bis zum Jahre 2005 verbinden, so müssen sich die dafür notwendigen Anstrengungen noch verstärken. Es muß beispielsweise gelingen,

- o die Möglichkeiten der rationellen Energieverwendung (insbesondere auch bei der elektrischen Energie) noch stärker auszuschöpfen,
- o den Einsatz erneuerbarer Energiequellen erheblich zu beschleunigen,
- o die Verwendung des vergleichsweise emissionsarmen Erdgases bis auf ein Niveau von rund 3 000 PJ (1987: knapp 2000 PJ) zu erhöhen.

Die Kraft-Wärme-Kopplung muß ebenfalls verstärkt angewendet werden. Es bestehen aber Unsicherheiten über den Umfang ihres bis zum Jahre 2005 letztlich zu realisierenden Versorgungsbeitrages. Daher wird das in der entsprechenden Einzelstudie genannte Potential der Kraft-Wärme-Kopplung in der Industrie und in der öffentlichen Fernwärmewirtschaft nicht vollständig ausgeschöpft, aber im Vergleich zur Politik-Variante des Reduktionsszenarios — noch ohne Berücksichtigung der zusätzlichen Beiträge der erneuerbaren Energiequellen in diesem Bereich (Biomasse-KWK) — dennoch deutlich stärker genutzt.

Im Hinblick auf die rationelle Energienutzung wurden im Ausstiegsszenario für den Endenergiebereich weitgehend die Werte aus der „Energieeinspar“-Variante entsprechend Kapitel 4 Nr.2 (vgl. Tab. 3) übernommen:

- Bei der Raumwärme der privaten Haushalte nimmt der Bedarf gegenüber 1987 — temperaturbereinigt — um rund 700 PJ (44 Prozent) ab. Das ist zu erreichen, wenn im Jahre 2005 von der dann vorhandenen Wohnfläche
  - etwa 20 Prozent auf Neubauten mit einem gegenüber den heutigen mittleren Bestandswerten um vier Fünftel geringeren durchschnittlichen Endenergiebedarf (statt rund 218 kWh Endenergie je m<sup>2</sup> nur noch knapp 40 kWh/m<sup>2</sup>),
  - etwa ein Drittel auf „sanierte“ Wohngebäude mit einem entsprechend um zwei Drittel niedrigeren Durchschnittsverbrauch (statt rund 218 kWh Endenergie je m<sup>2</sup> etwa 72 kWh/m<sup>2</sup>) sowie
  - knapp 47 Prozent auf den Altbestand entfallen, in dem sich lediglich die Nutzungsgradverbesserungen bei ohnehin fälligen Ersatzinvestitionen im Bereich der Heizungsanlagen verbrauchsmindernd (um etwa 23 Prozent, und zwar von rund 218 kWh Endenergie je m<sup>2</sup> auf knapp 167 kWh/m<sup>2</sup>) auswirken.

Bezogen auf den gesamten Wohngebäudebestand im Jahre 2005 ergibt sich der gegenüber 1987 niedrigere Endenergieverbrauch vor allem aus dem Zusammenwirken von zwei Effekten:

- der spezifische Wärmebedarf sinkt aufgrund verbesserter Wärmedämmung in Neubauten

und sanierten Altbauten von rund 110 W/m<sup>2</sup> (1987) um etwa ein Drittel auf fast 75 W/m<sup>2</sup>,

- der mittlere Jahresnutzungsgrad der Heizsysteme verbessert sich aufgrund des verstärkten Einsatzes von Brennwertkesseln und Wärmepumpen sowie insgesamt verbrauchsgünstigeren konventionellen Heizungsanlagen von 74 Prozent (1987) auf 97 Prozent (2005), also um gut 30 Prozent.
- Der Energieverbrauch der Haushalte für die Warmwasserbereitung nimmt wie im Reduktionsszenario „Energiepolitik“ um 46 PJ (24 Prozent) ab. Bei den Haushaltselektrogeräten wird – wie in der entsprechenden Einzelstudie für die Einsparvari-

ante – ein Rückgang um 98 PJ (39 Prozent) angenommen. Teilweise liegt dies auch in der Substitution durch Gasgeräte begründet, deren Verbrauch entsprechend um 42 PJ steigt.

Insgesamt ist der Endenergiebedarf der Haushalte – trotz der bedarfssteigernden Elemente (zum Beispiel größere Wohnfläche, steigende Geräteausstattung) – allein aufgrund der rationelleren Energieverwendung im Jahre 2005 um rund 800 PJ beziehungsweise um 39 Prozent niedriger als 1987.

- Durch Einsparungen im Bereich der Raumwärme, der Kälteerzeugung und der Beleuchtung vermindert sich der Endenergiebedarf der Kleinverbrau-

Tabelle 14

### Zusammenstellung der emissionsmindernden Maßnahmen in den Endenergiesektoren und im KWK-Bereich für das Reduktionsszenario „Kernenergieausstieg 2005“

	Energieverbrauch 1987	Änderungen 1988/2005 durch			Resultierender Endenergieverbrauch 2005 <sup>10)</sup>
		rationelle EnV <sup>1)</sup>	erneuerbare Energiequellen	substituierte fossile Energieträger	
Private Haushalte <sup>2)</sup> .....	2 034	– 801	–294	– 3	937
Kleinverbraucher .....	1 225	– 237	–291	– 6	691
Industrie <sup>3)</sup> .....	2 289	22	– 43	– 13	2 255
Verkehr <sup>4)</sup> .....	1 991	– 301	0	0	1 690
nicht behandelt <sup>5)</sup> .....	123	– 16	0	0	108
<b>SUMME ENDENERGIE</b> .....	<b>7 661</b>	<b>–1 332</b>	<b>–628</b>	<b>– 22</b>	<b>5 680</b>
davon <sup>6)</sup> .....					
– Steinkohle .....	649	– 94	– 9	–116	430
– Braunkohlen .....	169	– 60	– 9	– 30	70
– Benzin .....	1 066	– 435	0	0	631
– HEL <sup>7)</sup> .....	2 550	– 443	–401	–380	1 326
– HS .....	297	– 36	– 13	–170	78
– Gase .....	1 581	– 217	–111	684	1 937
– Fernwärme <sup>8)</sup> .....	195	– 41	0	0	155
– Strom .....	1 156	– 7	– 86	– 10	1 053
Brennstoffverbrauch für Kraft-Wärme-Kopplung .....					
Industrie .....	245	359	0	0	604
Heizkraftwerke .....	254	285	165 <sup>9)</sup>	0	539
<b>SUMME KWK</b> .....	<b>499</b>	<b>643</b>	<b>165<sup>9)</sup></b>	<b>0</b>	<b>1 143</b>

1) Energieverbrauch durch rationelle Energieverwendung einschließlich Wachstumseffekt ohne zusätzliche Substitution durch KWK

2) Endenergieverbrauch für Raumwärme 1987 temperaturbereinigt

3) Energieverbrauch einschl. Brennstoffe für eigenerzeugten und selbstverbrauchten Strom

4) Einschließlich Treibstoffverbrauch für internationalen Flugverkehr (1987 = 120 PJ)

5) Dezentrale Warmwasserversorgung mit Holz und Gas, Kraft und Treibstoffe für Militär und Landwirtschaft, Strom und Wärme im Verkehr, sonst. Stromverbr. von Haushaltskleingeräten

6) Energieträger für 1987 temperaturbereinigt

7) Heizöl extra leicht einschließlich Diesel- und Flugtreibstoffe

8) Fernwärme ohne zusätzliche Fern- und Nahwärmebereitstellung aus Kraft-Wärme-Kopplung

9) Strom- und Wärmeerzeugung in Biomasse-KWK-Anlagen, in Summe nicht berücksichtigt

10) Konventionelle Energieträger

cher um fast 240 PJ (19 Prozent), obwohl deren Bruttowertschöpfung bis 2005 noch um mehr als 50 Prozent steigt.

- Im Industriesektor können die rationelle Energienutzung und strukturelle Veränderungen zu weniger energieintensiven Produktionen die Einflüsse des Produktionszuwachses von 50 Prozent fast völlig kompensieren, so daß der industrielle Energiebedarf noch geringfügig um 22 PJ (1 Prozent) steigt.
- Im Verkehr führen die im Studienschwerpunkt A.6 diskutierten verkehrspolitischen Maßnahmen zugunsten einer stärkeren Nutzung öffentlicher Verkehrssysteme im Vergleich zum Reduktionsszenario „Energiepolitik“ beim Personenverkehr zu einer weiteren Verbrauchsminderung um 91 PJ, so daß bei gleichem Verbrauchsniveau im Güterverkehr im Gesamtsektor gegenüber 1987 etwa 300 PJ (15 Prozent) weniger Endenergie benötigt wird.
- Durch zusätzliche KWK-Anwendungen im industriellen und öffentlichen Bereich werden die Endenergiesektoren um einen Brennstoffverbrauch von zusätzlich 340 PJ entlastet. Die Stromerzeugung ist im Jahr 2005 (noch ohne Berücksichtigung des Einsatzes erneuerbarer Energiequellen in der Kraft-Wärme-Kopplung) mit knapp 300 PJ (83 TWh) etwa 2,8-mal so hoch wie 1987 (das sind etwa 16 Prozent mehr als im Reduktionsszenario „Energiepolitik“).

Durch verstärkten Einsatz erneuerbarer Energiequellen werden andere Energieträger zur Wärmebereitstellung im Endenergiebereich verdrängt. Insgesamt wird eine auf diesem Wege erreichbare Verbrauchsminderung um fast 630 PJ angenommen, wovon gut 190 PJ auf Solarkollektoranlagen, knapp 180 PJ auf direkt genutzte Wärme aus Biomasse, etwa 145 PJ auf Wärmepumpen und etwas mehr als 110 PJ auf solare Nahwärmesysteme entfallen. Schwergewichtig werden erneuerbare Energiequellen bei den Haushalten (294 PJ) und bei den Kleinverbrauchern (291 PJ) genutzt, während ihr Beitrag in der Industrie (43 PJ) begrenzt bleibt. Hinzu kommen noch rund 110 PJ, die als Wärme aus biomassegefeuerten KWK-Anlagen stammen und in dieser Höhe „konventionelle“ Energieträger im Endenergiesektor ersetzen. Damit würde das für diese Systeme ermittelte technische Potential (920 bis 1166 PJ) zu etwa 60 bis 80 Prozent ausgeschöpft. Das bei der vorgegebenen Energiepreissteigerung bis 2005 geschätzte wirtschaftliche Potential (117 bis 174 PJ) würde etwa um den Faktor 4 bis 6 übertroffen. Bei Energiepreissteigerungen mit Preispolitik würde das wirtschaftliche Potential (485 bis 662 PJ) um 30 Prozent übertroffen beziehungsweise nahezu vollständig ausgeschöpft.

Der Beitrag der erneuerbaren Energiequellen zur Stromerzeugung wird für 2005 mit rund 185 PJ (knapp 52 TWh) veranschlagt. Das sind etwa ein Drittel bis zwei Fünftel des technischen Potentials (136 bis 155 TWh) sowie das 1,4- bis 1,8-fache des für 2005 geschätzten wirtschaftlichen Potentials für eine Preisentwicklung ohne Preispolitik (28 bis 36 TWh). Gegenüber 1987 sind es 105 PJ (29 TWh) mehr. Am Zuwachs haben Biomasse-KWK-Anlagen (zusätzliche elektri-

sche Leistung gegenüber 1987 von 2,8 GW) sowie Windkraftwerke (rund 13 000 Anlagen mit einer Leistung von 5,2 GW) mit jeweils fast 11 TWh den größten Anteil. Es folgen die Laufwasserkraftwerke mit knapp 6 TWh und die Photovoltaik mit 2 TWh (1,8 GW Leistung). Für alle Stromerzeugungssysteme auf Basis erneuerbarer Energiequellen zusammen wären die Kapazitäten bis 2005 um etwa 11,3 GW auszuweiten.

Einen wesentlichen Beitrag zur angestrebten Reduktion der CO<sub>2</sub>-Emissionen muß die Substitution durch Erdgas leisten. Durch Substitution wird der Erdgas-einsatz bei den Endenergieverbrauchern bis 2005 um 684 PJ gesteigert. Für die KWK wird gegenüber 1987 fast 300 PJ mehr Gas verwendet. Insgesamt wird im Endenergie- sowie im KWK-Bereich im Jahre 2005 – bei Einrechnung des Gasersatzes durch erneuerbare Energiequellen – mit 2 390 PJ rund 625 PJ (35 Prozent) mehr Gas verbraucht als 1987. Unter Berücksichtigung anderer Gase bleiben bei der unterstellten maximalen Obergrenze für den Erdgasverbrauch demnach bis zu 800 PJ für die Verstromung in Kondensationskraftwerken, wodurch ein großer Teil des mit der Kernenergie entfallenden Stromerzeugungsbeitrages übernommen werden kann.

Im übrigen gelten für die Ausstiegsvariante hinsichtlich der rationellen Energieverwendung in den sonstigen Sektoren im wesentlichen die gleichen Annahmen wie für das Reduktionsszenario „Energiepolitik“. Insgesamt lassen die skizzierten Annahmen aber erkennen, daß die Umsetzung eines Ausstiegsszenarios einen vergleichsweise höheren energiepolitischen Handlungsbedarf erfordert. Dies gilt naturgemäß zunächst einmal im Hinblick auf die politische Durchsetzung eines Beschlusses zur Stilllegung der Kernkraftwerke und die damit verbundenen Implikationen. Hierzu sei auf die im Anschluß an die Reaktorkatastrophe in Tschernobyl erarbeiteten Studien verwiesen. Entscheidend wird es aber darauf ankommen, die hier veranschlagten Potentiale zur rationellen Energieverwendung und -bereitstellung sowie zur Nutzung erneuerbarer Energiequellen zu mobilisieren. Dabei ist es nicht auszuschließen, daß bereits der Entschluß, auf die weitere Nutzung der Kernenergie zu verzichten und insoweit eine angebotslimitierende Politik zu betreiben, einerseits Innovationspotentiale freisetzt und andererseits neue Einsatzgebiete zum Beispiel für eine verstärkte Anwendung der Kraft-Wärme-Kopplung eröffnet.

In jedem Fall sind über die in Kapitel Nr. 1.2 genannten Maßnahmen hinaus weitere Aktivitäten erforderlich, die sich in erster Linie der Instrumente der finanziellen Förderung und/oder der Steuerung über den Energiepreis bedienen müssen. Im Rahmen der Einzelstudien konnte gezeigt werden, daß eine gegenüber den Vorgaben deutliche Erhöhung der Energiepreise beziehungsweise eine äquivalente finanzielle Unterstützung erhebliche zusätzliche wirtschaftliche Potentiale erschließbar werden läßt. Besonders geeignet erscheint dabei eine Kombination von Energiepreisanhebungen mit gleichzeitiger Verwendung der Mittel für die finanzielle Förderung der hier angesprochenen Maßnahmen. Für ein Ausstiegsszenario ist der Einsatz solcher Instrumente eine wesentliche Voraussetzung.

### 1.3.2 Ergebnisse des Ausstiegs-Szenarios bis 2005

Unter Berücksichtigung der angenommenen Maßnahmen zur rationellen Energieverwendung, zur Nutzung der erneuerbaren Energiequellen und zur Substitution durch Erdgas (aber noch ohne die Energieträgersubstitution durch Wärme aus KWK-Anlagen) summiert sich der Energieverbrauch in den Endenergiesektoren im Jahre 2005 auf 5 680 PJ. Das sind 1 980 PJ oder etwa ein Viertel weniger als 1987. Im Vergleich zum Reduktionsszenario „Energiepolitik“ bedeutet es für 2005 eine zusätzliche Verminderung um knapp 790 PJ (12 Prozent).

Aus sektoraler Sicht werden die größten „Einsparpotentiale“ im Bereich der privaten Haushalte mobilisiert, wo der Energiebedarf gegenüber 1987 bis 2005 um mehr als die Hälfte sinkt. Bei den Kleinverbrauchern ergibt sich eine Verbrauchsreduzierung um etwa 44 Prozent. Dagegen vermindert sich der Energieverbrauch im Personenverkehr trotz der hier unterstellten eingriffsintensiven Maßnahmen (vgl. den Einzelbericht zu A.6 „Reduktions-Szenario“) lediglich um 20 Prozent, und im Güterverkehr wie in der Industrie bleibt er praktisch auf dem heutigen Niveau.

Die Struktur der in den Endenergiesektoren eingesetzten Energieträger wird sich deutlich verändern. Bei den Kohlen (Stein- und Braunkohle) ergibt sich von 1987 bis 2005 ein Rückgang um nahezu 40 Prozent und bei den Mineralölprodukten sogar ein solcher von beinahe 50 Prozent. Der Stromverbrauch ist gegenüber 1987 um rund 9 Prozent und gegenüber

dem Reduktionsszenario um etwa 11 Prozent niedriger. Dagegen nimmt der Gasverbrauch um mehr als ein Fünftel zu.

Bei einer Bewertung dieser Ergebnisse ist indes zu beachten, daß der Einsatz erneuerbarer Energiequellen in den vorstehenden Angaben über den Endenergieverbrauch nicht explizit enthalten ist, sondern nur in den substituierten Energieträgern zum Ausdruck kommt. Außerdem wird die Energie, die aus KWK-Anlagen ausgekoppelt wird, aber der Substitution von Energieträgern im Endenergiebereich dient, erst in einem weiteren Rechenschritt als Abzugsposten bei der Endenergie berücksichtigt (vgl. Tab. 17). Insoweit würde der tatsächliche Endenergieverbrauch entsprechend höher ausfallen.

Die Stromerzeugung aus KWK-Anlagen spielt in der Ausstiegsvariante eine stärkere Rolle als im Reduktions-Szenario „Energiepolitik“. Im Ergebnis wird für 2005 ein Stromerzeugungsbeitrag von 366 PJ, also etwa 100 TWh, geschätzt (davon entfallen knapp 54 PJ oder 15 TWh auf biomassegefeuerte KWK-Anlagen). Hinzu kommt die sonstige industrielle Eigenerzeugung zur Eigennutzung, die über den gesamten Zeitraum hinweg auf gleichbleibend 106 PJ beziehungsweise rund 29 TWh veranschlagt wird. Dadurch vermindern sich die Anforderungen an die ungekoppelte Stromerzeugung, die von beinahe 1 300 PJ beziehungsweise knapp 360 TWh (1987) auf fast 900 PJ (2005) zurückgeht (vgl. Tab. 15). Insgesamt vermindert sich die Bruttostromerzeugung von 1987 bis 2005 um etwa 9 Prozent.

Tabelle 15

#### Struktur der Stromerzeugung und des Brennstoffeinsatzes im Jahre 1987 und 2005 im Reduktionsszenario „Kernenergieausstieg 2005“

	Stromerzeugung (TWh)		Brennstoffeinsatz (PJ)	
	1987	2005	1987	2005
<b>Ohne KWK</b>				
Steinkohlen .....	106,8	64,1	973,3	569,8
Braunkohlen .....	76,6	42,1	784,2	415,3
Heizöle .....	2,8	0,0	25,5	0,0
Gase .....	21,5	103,6	169,7	744,6
<b>Summe fossiler Brennstoffe .....</b>	<b>207,7</b>	<b>209,8</b>	<b>1952,7</b>	<b>1729,7</b>
Wasserkraft .....	20,6	26,1	184,0	215,5
Kernenergie .....	130,5	0,0	1 232,7	0,0
Windenergie .....	0,0	10,7	0,0	88,3
Photovoltaik .....	0,0	2,0	0,0	16,5
<b>ZWISCHENSUMME .....</b>	<b>358,8</b>	<b>246,7</b>	<b>3369,4</b>	<b>2050,0</b>
<b>KWK und sonstige <sup>1)</sup> .....</b>	<b>59,4</b>	<b>131,2</b>	×	×
<b>Bruttostromerzeugung .....</b>	<b>418,3</b>	<b>379,9</b>	×	×

<sup>1)</sup> Einschließlich industrielle Eigenerzeugung zur Eigennutzung (1987 29,5 TWh)



Ohne weitere Nutzung der Kernenergie und nach Abzug des Stromerzeugungsbeitrages der erneuerbaren Energiequellen (140 PJ beziehungsweise 39 TWh) müssen demnach nur noch rund 755 PJ beziehungsweise 210 TWh durch fossilgefeuerte Kraftwerke gedeckt werden; davon 30 Prozent durch Steinkohlenkraftwerke, 20 Prozent durch Braunkohlen- und 50 Prozent durch Erdgaskraftwerke. Damit würden rund 100 TWh Erdgas in Kondensationskraftwerken – zum großen Teil in der Grundlast – verstromt, also beinahe das 5-fache gegenüber 1987. Anders als bei Steinkohlenkraftwerken, bei denen die Kondensationsstromerzeugung um etwa zwei Fünftel, und bei Braunkohlenkraftwerken, bei denen sie um 45 Prozent zurückgefahren wird, setzt die hier verfolgte Strategie auch unter Berücksichtigung der gegenwärtig vorhandenen „freien“ Kapazitäten bei Erdgaskraftwerken den Neubau entsprechender Kraftwerksleistungen voraus. Nach einer überschlägigen Schätzung müßte vermutlich die gegenwärtige Kapazität der Gaskraftwerke (einschl. KWK-Anlagen) bis 2005 um 8 bis 10 GW aufgestockt werden. Hierbei ist noch nicht die Möglichkeit berücksichtigt, Steinkohlenkraftwerke mit Erdgas-Vorschaltturbinen auszurüsten.

Hinzuweisen ist darauf, daß es für den hier unterstellten Mix der Kohlenkraftwerke auch andere Möglichkeiten gibt, ohne das vorgegebene CO<sub>2</sub>-Reduktionsziel zu verfehlen.

Das läßt sich beispielsweise dadurch erreichen, daß die Braunkohlenkraftwerke zugunsten der Steinkohle stärker zurückgefahren werden (gleichzeitig ließe sich auch die Erdgasverstromung vermindern). Beschränkungen einer solchen Strategie könnten sich

aber daraus ergeben, daß unterhalb einer bestimmten absatzfähigen Menge der Braunkohlenbergbau insgesamt nicht mehr aufrechtzuerhalten wäre. Um welche Menge es sich dabei handelt, konnte im Rahmen dieser Untersuchung allerdings nicht geklärt werden.

Einschließlich der mit den substituierten Brennstoffen bewerteten erneuerbaren Energiequellen reduziert sich der gesamte Energieeinsatz unter den Bedingungen des Ausstiegsszenarios von knapp 10,8 EJ im Jahre 1987 um fast ein Viertel auf 8,2 EJ im Jahre 2005 (vgl. Tab. 16). Besonders stark geht der Verbrauch von Mineralölprodukten (54 Prozent) und von Braunkohlen (46 Prozent) zurück, während sich derjenige von Steinkohlen nur um etwa ein Viertel (auf rund 48 Millionen Tonnen SKE) vermindert. Dagegen steigt der Gasverbrauch in der Periode von 1987 bis 2005 von knapp 2,3 EJ auf gut 3,3 EJ (48 Prozent). Davon entfallen auf das Erdgas etwa 3 EJ oder gut 100 Millionen Tonnen SKE, also rund 35 Millionen Tonnen SKE, die gegenüber heute zusätzlich zu beschaffen sind. Zusammengenommen erhöht sich der Versorgungsbeitrag aller erneuerbaren Energiequellen (Strom- und Wärmeerzeugung) von rund 320 PJ (1987) um mehr als das Dreifache auf etwa 1060 PJ (2005); ihr Anteil am Energieverbrauch insgesamt nimmt damit von rund 3 Prozent auf knapp 13 Prozent zu.

Entsprechend der Vorgabe können die CO<sub>2</sub>-Emissionen bis 2005 im Ergebnis wie im Reduktionsszenario „Energiepolitik“ um rund 205 Millionen Tonnen, also gegenüber 1987 um beinahe 29 Prozent, gesenkt werden (vgl. Tab. 17). Während sich die Emissionen im Endenergiebereich aufgrund der verstärkten rationellen Energienutzung, der wachsenden Verwendung

Tabelle 16

**Gesamter Energieverbrauch nach Energieträgern<sup>1)</sup> im Jahre 1987 und 2005  
im Reduktionsszenario „Kernenergieausstieg 2005“**

Energieträger	1987		2005		1987/2005 %
	PJ	%	PJ	%	
Steinkohlen .....	1 878	17,4	1 404	17,1	– 25,2
Braunkohlen .....	1 016	9,4	548	6,7	– 46,1
Mineralölprodukte .....	4 060	37,6	1 857	22,6	– 54,3
Gase .....	2 250	20,9	3 331	40,5	48,0
<b>Summe fossiler Brennstoffe .....</b>	<b>9 204</b>	<b>85,3</b>	<b>7 140</b>	<b>86,7</b>	<b>– 22,4</b>
Wasserkraft .....	184	1,7	215	2,6	17,1
Kernenergie .....	1 233	11,4	0	0,0	–100,0
Windenergie .....	0	0,0	88	1,1	
Photovoltaik .....	0	0,0	16	0,2	
Stromimportsaldo .....	36	0,3	32	0,4	– 11,6
Sonstige erneuerbare Energiequellen ..	135	1,3	740	9,0	448,1
<b>Gesamtsumme<sup>2)</sup> .....</b>	<b>10 792</b>	<b>100,0</b>	<b>8 232</b>	<b>100,0</b>	<b>– 23,7</b>

1) Abweichungen vom Primärenergieverbrauch durch Nichtberücksichtigung des nichtenergetischen Verbrauchs des sonstigen Energieaußenhandels u. a.

2) Bewertet mit den substituierten Energieträgern ohne Berücksichtigung von energiebewußtem Verhalten

erneuerbarer Energiequellen und der Substitution durch Erdgas um 179 Millionen Tonnen CO<sub>2</sub> (40 Prozent) vermindern, kommt es im Bereich der Kraft-Wärme-Kopplung mit zusätzlichen 42 Millionen Tonnen CO<sub>2</sub> bis zum Jahre 2005 etwa zu einer Verdoppelung. Dagegen gehen sie bei Kondensationskraftwerken um 49 Millionen Tonnen CO<sub>2</sub> (26 Prozent) und in den sonstigen Umwandlungsbereichen insgesamt um etwa 19 Millionen Tonnen CO<sub>2</sub> (58 Prozent) zurück.

Bei den vorstehenden Rechnungen sind die denkbaren Auswirkungen eines energiebewußteren Verhaltens sowie eines freiwilligen Verzichts auf die Inan-

spruchnahme von Energiedienstleistungen nicht berücksichtigt worden. Es würde der Logik eines Ausstiegsszenarios, das den breiten Konsens innerhalb der Bevölkerung zugunsten eines Verzichts auf die Nutzung der Kernenergie voraussetzt, entsprechen, wenn in diesem Fall von den vielfältigen individuellen Möglichkeiten verstärkt Gebrauch gemacht wird. In Anlehnung an die Schätzungen in Kapitel 4 Nr. 2.7 wäre demnach eine zusätzliche Reduktion der CO<sub>2</sub>-Emissionen um vielleicht 5 Prozent denkbar. Das bedeutet eine Reduktionsquote von insgesamt bis zu einem Drittel.

Tabelle 17

**Verbrauch von fossilen Energieträgern und Kernbrennstoffen im Jahre 1987 und 2005  
sowie Emissionen im Reduktionsszenario „Kernenergieausstieg 2005“**

Sektoren	Brennstoffe (PJ)		Emissionen 2005			
	1987	2005	CO <sub>2</sub> (Mio. t)	CH <sub>4</sub> (1 000 t)	NMVOG (1 000 t)	NO <sub>x</sub> (1 000 t)
<b>Endenergiesektoren</b>						
Haushalte .....	1 615	695	41,2	5,5	2,1	24,4
Kleinverbraucher .....	870	411	24,6	0,6	3,3	10,7
Industrie .....	1 782	1 664	112,8	3,3	3,2	138,9
Verkehr .....	1 961	1 642	119,8	13,8	215,1	738,0
nicht beh. Sektoren .....	83	61	4,6	0,4	2,2	10,7
Brennstoff-Substitutionen durch KWK .....	0	-439	-29,1	-2,2	-1,5	-22,6
<b>Summe Endenergiesektoren .....</b>	<b>6 311</b>	<b>4 034</b>	<b>273,9</b>	<b>21,4</b>	<b>224,4</b>	<b>900,1</b>
<b>Umwandlungssektoren</b>						
Kalt-Wärme-Kopplung und Heizkraftwerke .....	499	1 143	82,2	12,6	4,3	79,5
Brennstoffe Kond.-Kraftwerke insgesamt .....	3 185	1 730	140,1	0,9	2,7	93,2
– Steinkohlen .....	973	570	52,6	0,3	0,6	38,7
– Braunkohlen .....	784	415	46,5	0,2	0,4	33,6
– Heizöle .....	25	0	0,0	0,0	0,0	0,0
– Gase .....	170	745	41,0	0,4	1,7	20,8
Uran (1) .....	1 233	0	0,0	0,0	0,0	0,0
Eigenverbrauch sonstige Umwandlungssektoren (2) .....	404	182	11,0	1 349	0,2	6,1
Leistungsverluste (Gas) .....	38	53	2,9	6,7	0,1	1,6
<b>Summe der Emissionen 2005<sup>3)</sup> .....</b>			<b>510</b>	<b>1 391</b>	<b>232</b>	<b>1 080</b>
<b>Zum Vergleich</b>			<b>715</b>	<b>1 797</b>	<b>1 530</b>	<b>2 599</b>
<b>Summe der Emissionen 1987</b> <b>Reduktion 1987/2005<sup>3)</sup></b>			<b>-205</b>	<b>-406</b>	<b>-1 298</b>	<b>1 519</b>
– absolut .....			<b>-205</b>	<b>-406</b>	<b>-1 298</b>	<b>1 519</b>
– in % .....			<b>- 28,7</b>	<b>- 22,6</b>	<b>- 84,9</b>	<b>- 58,4</b>

1) Errechnet nach der Substitutionsmethode.

2) Bei CH<sub>4</sub>-Emissionen einschließlich vorgelagerte Stufen.

3) Ohne Berücksichtigung von energiebewußtem Verhalten

Tabelle 18

**Investitionssummen in den Jahren 1987 bis 2005  
und jährliche Nettokosten im Reduktionsszenario  
„Kernenergieausstieg 2005“**

	Investitions- kosten Mrd. DM	jährliche Netto- kosten <sup>1)</sup> Mio. DM/a
<b>Rationale Energieverwendung</b>		
– Private Haushalte		
Raumwärme .....	217	2 930
Elektrogeräte .....	2,6	– 1 937
– Kleinverbraucher		
Bereich 2 <sup>2)</sup> .....	21	200
Bereich 1 .....	keine Angaben	
– Industrie .....	keine Angaben	
– KWK, HKW und Fern- wärme .....	57	730
– Raffinerien .....	1,3	– 45
Zwischensumme .....	298,9	1 878
<b>Erneuerbare Energiequellen</b>		
– therm. Kollektoren .....	61,5	2 372
– solare Nahwärme .....	30,9	217
– Wärmepumpen in HH und KV <sup>3)</sup> .....	73,7	3 551
Zwischensumme .....	166,1	6 140
		Strom- erzeu- gungs- kosten (DM/ kWh)
– Wasserkraft .....	9,9	0,112
– Windkonverter .....	10,6	0,098
– Biomasse .....	6,6	0,170
– PV .....	11,5	0,357
Zwischensumme .....	38,7	0,147
<b>Substitution durch Erdgas<sup>4)</sup></b>		
– private Haushalte .....	k.A.	– 128
– Kleinverbraucher .....	k.A.	– 35
– Industrie .....	k.A.	898
– Kondensationskraftwerke .	k.A.	603
Zwischensumme .....	k.A.	1 338
<b>Gesamtsumme<sup>5)</sup> .....</b>	<b>503,7</b>	<b>9 356</b>
– pro Kopf (DM) .....	8 394	156

<sup>1)</sup> Gesamtkosten abzüglich eingesparter Energiekosten bei Preisentwicklung ohne Preispolitik.

<sup>2)</sup> Raumwärmeintensive Branchen.

<sup>3)</sup> Nur Kapitaleinsatz abzüglich Energiekosteneinsparung.

<sup>4)</sup> Die Substitution von Steinkohle mit Kohlenimportpreisen bewertet.

<sup>5)</sup> Investitionskosten ohne Substitution durch Erdgas; Nettokosten ohne Stromerzeugung auf Basis erneuerbarer Energiequellen.

Die Emissionsänderungen der anderen klimarelevanten Spurengase sind nur sehr schwierig abzuschätzen, da diese weniger vom Brennstoff selbst, sondern vorrangig von der verwendeten Verbrennungstechnik abhängen. Die in Tabelle 17 ausgewiesenen Ergebnisse sind deshalb auch mit Vorbehalten zu interpretieren. Ein Vergleich mit den Emissionen im Jahre 1987 zeigt in allen Endverbrauchsbereichen einen kräftigen Rückgang; insgesamt vermindern sich dort die CH<sub>4</sub>-Emissionen bis 2005 um rund 80 Prozent und die NMVOC-Emissionen um rund 75 Prozent. An diesem Rückgang sind vor allem die Haushalte und der Verkehr beteiligt. Die NO<sub>x</sub>-Emissionen werden von knapp 2,2 Millionen Tonnen im Jahre 1987 um 59 Prozent auf 0,9 Millionen Tonnen im Jahre 2005 reduziert. Hierzu trägt allein der Verkehr mit einer Minderung von nahezu 1,1 Millionen Tonnen bei. Über alle Sektoren hinweg gehen die CH<sub>4</sub>-Emissionen um 23 Prozent, die NO<sub>x</sub>-Emissionen um gut 58 Prozent und die NMVOC-Emissionen sogar um 85 Prozent zurück.

### 1.3.3 Weitere Implikationen des Ausstiegs-Szenarios

Die Realisierung des Ausstiegsszenarios setzt eine grundlegend gewandelte Energie- und Verkehrspolitik mit den Schwerpunkten rationelle Energieverwendung, Ausbau der Kraft-Wärme-Kopplung, Nutzung erneuerbarer Energiequellen sowie Substitution durch Erdgas voraus. Aufgrund fehlender Informationen aus den Einzelstudien war es nicht möglich, ein geschlossenes Bild über die mit diesem Szenario verbundenen Kosten und deren wirtschaftliche Bewertung zu geben, so daß sich die folgende Betrachtung auf einzelne Elemente beschränken muß.

Unter Berücksichtigung der in Kapitel 4 Nr.2 genannten Werte ist zur Realisierung der für das Ausstiegsszenario unterstellten Einsparvariante in einzelnen Bereichen bis 2005 mit den in Tabelle 18 ausgewiesenen Investitionskosten und jährlichen Nettokosten zu rechnen.

Insgesamt wäre daher für alle bewertbaren Maßnahmen bis 2005 ein Investitionsvolumen von rund 500 Milliarden DM erforderlich. Die jährlichen Nettokosten können auf fast 10 Milliarden DM veranschlagt werden. Je Einwohner sind dies knapp 160 DM pro Jahr. Dabei resultieren die hohen Nettokosten vor allem aus den angenommenen Maßnahmen zur Nutzung erneuerbarer Energiequellen sowie zur rationellen Energieverwendung im Bereich der Raumwärme.

Entscheidend für die wirtschaftliche Bewertung dieser Ergebnisse ist die Tatsache, daß verabschiedungsgemäß durchweg die vorgegebene – moderate – Energiepreissteigerung unterstellt worden ist (vgl. Tab. 1). Unter diesen Bedingungen, die allerdings mit der Logik eines Ausstiegsszenarios kaum vereinbar sind, muß das Ergebnis ungünstig ausfallen. So läßt sich am Beispiel der Wärmebereitstellungssysteme auf Basis von erneuerbaren Energiequellen zeigen, daß sich dann nur ein Teil davon (zum Beispiel Solarkollektoren zur Schwimmbadbeheizung – in Ausnahmefällen zur Warmwasserbereitung –, kleine solare Nahwär-

mesysteme, die Verbrennung von Holz und Stroh sowie bei ansonsten günstigen Annahmen unter Umständen auch Wärmepumpen) wirtschaftlich „rechnet“:

- Bei Solarkollektoren wird bis 2005 die Installation von 6,8 Millionen Anlagen mit einer Kollektorfläche von gut 100 Millionen m<sup>2</sup> angenommen. Die Investitionskosten dafür werden mit 61,5 Milliarden DM und die jährlichen Gesamtkosten mit 6,4 Milliarden DM veranschlagt. Da auf diese Weise die Energiekosten (bei den vorgegebenen moderaten Energiepreisen) pro Jahr nur um rund 4 Milliarden DM reduziert werden können, ergibt sich ein jährliches „Defizit“ von knapp 2,4 Milliarden DM. Dieses auszugleichen erfordert entweder einen Investitionskostenzuschuß von rund 50 Prozent oder eine Anhebung der hier maßgeblichen Energiepreise von etwa 7,4 Pf/kWh beziehungsweise 20 DM/GJ (angenommener Energiepreismix 2005 für Haushalte und Kleinverbraucher) um rund 60 Prozent auf 11,8 Pf/kWh (32,8 DM/GJ).
- Bei solaren Nahwärmesystemen ist der Einsatz kleiner Systeme mit niedrigen Deckungsraten konkurrenzfähig, doch ist deren Potential nicht allzu hoch, so daß auch auf größere Systeme übergegangen werden muß, die allerdings auch im Jahre 2005 bei den vorgegebenen Energiepreisen noch nicht wettbewerbsfähig sind. Für das Ausstiegsszenario wurde für die wirtschaftlichen kleinen solaren Nahwärmesysteme eine installierte Kollektorfläche von 14,4 Millionen m<sup>2</sup> und für die großen Systeme von 63 Millionen m<sup>2</sup> unterstellt. Die gesamten Investitionskosten betragen knapp 31 Milliarden DM (kleine Systeme: 3,9 Milliarden DM) und die jährlichen Gesamtkosten rund 2,6 Milliarden DM (kleine Systeme: 0,4 Milliarden DM). Bei jährlichen Energiekosteneinsparungen von gut 2,4 Milliarden DM (kleine Systeme: 0,68 Milliarden DM) ergibt sich also insgesamt eine Unterdeckung von etwa 0,2 Milliarden DM pro Jahr (kleine Systeme: Kosteneinsparung von fast 0,3 Milliarden DM; große Systeme: zusätzliche Kosten von rund 0,5 Milliarden DM). Konkurrenzfähigkeit bei den großen Systemen würde bei einem Investitionskostenzuschuß von etwa einem Viertel oder einer Energiepreissteigerung von 7,8 Pf/kWh (unterstellter Energiepreismix für 2005) auf 10 Pf/kWh (27,7 DM/GJ) – also um rund 28 Prozent – erreicht.

Insgesamt können die Investitionskosten für die Wärmebereitstellungssysteme erneuerbarer Energiequellen (ohne Biomasse, für die keine Angaben vorliegen) im Ausstiegsszenario bis zum Jahre 2005 auf 166 Milliarden DM (brutto) veranschlagt werden; die jährlichen Nettokosten würden sich bei den moderaten Preisannahmen auf gut 6,1 Milliarden DM belaufen. Bei einer gegenüber diesen Vorgaben – je nach Nutzungssystem – um 30 bis 60 Prozent höheren Energiepreisen im Jahre 2005 wäre demgegenüber unter der Voraussetzung, daß die angenommenen Kosten für die erneuerbaren Energiequellen erreicht werden können, mit einem im wesentlichen ausgeglichenen Ergebnis zu rechnen.

Der Investitionsaufwand für die von 1988 bis 2005 neu zu bauenden Stromerzeugungssysteme auf Basis er-

neuerbarer Energiequellen wird bis 2005 auf insgesamt knapp 39 Milliarden DM (brutto) geschätzt; der jährliche Kapitaldienst dafür beträgt etwa 2,7 Milliarden DM. Von den Systemen dürfte die Wasserkraft mit einem Investitionsvolumen von etwa 10 Milliarden DM als im wesentlichen konkurrenzfähig angesehen werden; auch die Stromerzeugung in Biomasse-KWK-Anlagen (geschätzte Investitionskosten 6,6 Milliarden DM) dürfte nicht weit von der Wirtschaftlichkeitsschwelle entfernt sein, Aussagen darüber lieferte die dazu erstellte Studie allerdings nicht. Die Windenergie ist mit einem Investitionsvolumen von fast 11 Milliarden DM wohl nur unter günstigen Randbedingungen konkurrenzfähig. Zwar werden die mittleren Stromerzeugungskosten auf weniger als 10 Pf/kWh geschätzt, so daß die Wirtschaftlichkeit bei einem Vollkostenvergleich mit konventionellen Stromerzeugungssystemen gegeben wäre, doch kann nur ein Teil der leistungsabhängigen fixen Kosten berücksichtigt werden. Daher würde der Einsatz der Windenergie in dem für das Ausstiegsszenario unterstellten Umfang ohne eine finanzielle Förderung aus einzelwirtschaftlicher Sicht nur bedingt realisierbar sein. Dies gilt bis 2005 in jedem Fall für die Photovoltaik, deren Stromerzeugungskosten selbst unter den sehr günstigen Annahmen hinsichtlich ihrer Investitionskosten (gesamtes Investitionsvolumen bis 2005 etwa 11,5 Milliarden DM) noch immer bei 36 Pf/kWh liegen würden. Ohne eine starke Unterstützung kann daher nicht mit dem angenommenen Einsatz von PV-Anlagen mit einer Leistung von rund 1 800 MW gerechnet werden. Insgesamt ist die im Ausstiegsszenario angenommene Nutzung der erneuerbaren Energiequellen ohne entsprechende Anreize durch höhere Energiepreise und/oder durch eine deutliche finanzielle Förderung nicht zu erwarten. Nicht abzusehen sind allerdings die Impulse, die im Falle eines angebotsverknappenden Ausstiegs aus der Kernenergie entstehen könnten.

Umgekehrt begünstigen die Preisvorgaben tendenziell die wirtschaftliche Einschätzung der KWK-Systeme (s. o.), denen in der Ausstiegsvariante eine wesentliche Rolle zugeordnet ist. Hier dürften sich – insbesondere unter der Annahme, daß keine Stromerzeugungskapazität auf Kernenergiebasis mehr zur Verfügung steht – positive wirtschaftliche Einsatzmöglichkeiten ergeben, sofern dies die Verbrauchscharakteristik für Strom und Wärme zuläßt. Allerdings summieren sich die jährlichen Nettokosten nach den vorliegenden Berechnungen immerhin auf rund 730 Millionen DM.

Die angenommenen Substitutionen durch Erdgas profitieren unter dem Gesichtspunkt der Kosteneffizienz ebenfalls von den vergleichsweise niedrigen Preisen. Wie in der entsprechenden Einzelstudie gezeigt werden konnte, ist die Substitution durch Erdgas in den Endenergiesektoren meist auch wirtschaftlich (vgl. Tab. 18). Dies gilt jedoch nicht für den verstärkten Gaseinsatz in der Industrie und zur Stromerzeugung, sofern hier der Einsatz von billiger Import(stein)kohle und Braunkohle als Substitut unterstellt wird. In diesem Fall wäre für die Industrie mit zusätzlichen Kosten in einer Größenordnung von 900 Millionen DM/a und für Kraftwerke mit solchen von rund 600 Millionen DM/a zu rechnen. Generell muß außerdem angenommen werden können, daß eine Steigerung des

Gasverbrauchs auf bis zu 3 000 PJ/a keinen wesentlichen Einfluß auf die Gaspreise haben wird.

Quantitativ nicht zu beantworten war die Frage nach den gesamtwirtschaftlichen Rückwirkungen des hier skizzierten Ausstiegsszenarios. Wesentlich ist die Frage der volkswirtschaftlichen Kosten auch im Hinblick auf die Wirtschaftsbereiche, die von einer Strategie, die sich sowohl die CO<sub>2</sub>-Emissionsreduktion als auch den Ausstieg aus der Kernenergie zum Ziel gesetzt hat, negativ betroffen werden. Wie die Ergebnisse des Ausstiegsszenarios zeigen, sind dies neben den direkt und indirekt mit der Kernenergie verbundenen Sektoren vor allem die Mineralölindustrie sowie der Bergbau, die beide mit erheblichen Absatzeinbußen und den daraus folgenden wirtschaftlichen und sozialen Implikationen konfrontiert wären. Der Ölverbrauch würde sich um mehr als die Hälfte, der Verbrauch von Braunkohlen fast um die Hälfte verringern. Der Steinkohlenverbrauch geht dagegen nur um ein Viertel zurück; im Jahre 2005 beträgt er noch beinahe 50 Millionen Tonnen SKE — ein Wert, der sich dem Mehrheitsvotum der sogenannten Mikat-Kommission nähert.

Insbesondere im Kraftwerkspark würden sich erhebliche Umschichtungen ergeben, und zwar einerseits zu Lasten der Stromerzeugung in Steinkohlen-, vor allem aber in Braunkohlenkraftwerken, andererseits zugunsten einer erheblich zu steigernden Stromerzeugung auf Erdgasbasis. Folgen wären die vorfristige Stilllegung von Kernkraftwerken und von Kohlenkraftwerken bei einem gleichzeitigen Neubau von Erdgaskraftwerken.

Bei einer Interpretation dieser Zusammenhänge ist allerdings daran zu erinnern, daß ein großer Teil der hier nur angedeuteten volkswirtschaftlichen Implikationen weniger auf den unterstellten Ausstieg aus der Kernenergie zurückzuführen ist, sondern bei einer jeden Strategie, die eine drastische Reduktion der Emissionen klimarelevanter Spurengase — und damit des Verbrauchs fossiler Energieträger — erreichen will, unvermeidbar sein wird. Umgekehrt fallen die Konsequenzen zumindest für den einheimischen Bergbau bei einer Ausstiegsstrategie weniger stark ins Gewicht als bei einer weiteren Nutzung der Kernenergie auf heutigem oder sogar auf höherem Niveau.

Alles in allem dürfte die Verfolgung der beiden genannten Ziele zumindest in dem überschaubaren Zeitraum bis 2005 mit zusätzlichen Belastungen verbunden sein. Bei einer Gesamtbewertung wären dem jedoch die aus dem Weiterbetrieb oder dem Ausbau der Kernkraftwerke folgenden Risiken und zunehmenden Entsorgungsprobleme gegenüberzustellen.

Die Abwägung zwischen den Risiken der unterschiedlichen Reduktionsszenarien kann wissenschaftlich kaum entschieden werden, sondern muß dem politischen Entscheidungsprozeß vorbehalten bleiben.

Insgesamt erscheint das vorstehend skizzierte Ausstiegsszenario bei einer entsprechend veränderten Politik, die auch die Zustimmung der Bevölkerung gewinnen müßte, realisierbar. Es ist also denkbar, das Ziel der CO<sub>2</sub>-Emissionsreduktion in dem vorgegebenen Umfang mit demjenigen eines bis 2005 zu vollziehenden Ausstiegs aus der Kernenergie zu verbinden.

Allerdings läßt sich vermuten, daß die gleichzeitige Verfolgung beider Ziele teilweise zu einer zusätzlichen wirtschaftlichen Belastung führen würde. Festzustellen ist auch, daß das zuvor beschriebene Szenario aus einzelwirtschaftlicher Sicht mit den vorgegebenen moderaten Energiepreissteigerungen nicht kompatibel ist. Zur seiner Realisierung wären von daher auch preispolitische Maßnahmen unabdingbar.

### **1.3.4 Ausstieg aus der Kernenergie bis zum Jahr 1995**

#### **1.3.4.1 Ausführungen zum Kernenergieausstieg 1995 in der Energiesystemstudie der Enquete-Kommission**

Die Gründe, die für die Notwendigkeit eines Verzichts auf die Nutzung der Kernenergie genannt werden, könnten es nahelegen, einen Ausstieg nicht erst bis 2005, sondern schon weitaus kurzfristiger zu vollziehen. Zu diskutieren waren daher auch die Implikationen eines Ausstiegs aus der Kernenergie bis spätestens 1995. Schon weil die Einzelstudien für diesen kurzfristigen Zeitraum keine Aussagen gemacht haben, war es allerdings nicht möglich, dazu auch nur annähernd belastbare Aussagen zu treffen wie für den zuvor skizzierten Fall eines Ausstiegs bis 2005. Insofern verstehen sich die folgenden Ausführungen eher als qualitative Hinweise auf die mit einem so raschen Ausstieg verbundenen Folgen insbesondere für die Entwicklung der CO<sub>2</sub>-Emissionen.

Zweifellos erhalten die für das Ausstiegsszenario 2005 beschriebenen Maßnahmen bei einer Stilllegung aller Kernkraftwerke bis 1995 eine noch größere Dringlichkeit. Andererseits kann nicht angenommen werden, daß eine so kurzfristige Umsetzung dieser Maßnahmen gelingt. Für die folgenden Überlegungen wird daher vereinfachend davon ausgegangen, daß sich von den Veränderungen in den Endenergiesektoren, bei der Kraft-Wärme-Kopplung, bei der Stromerzeugung und bei den sonstigen Umwandlungsbereichen, wie sie sich im Ausstiegsszenario 2005 im Vergleich zu 1987 ergeben, bis zum Jahre 1995 nur reichlich ein Viertel (statt bei proportionaler Verteilung über die Zeit gut zwei Fünftel) durchsetzen werden. Daraus ergeben sich als Anhaltswerte die in Tabelle 19 zusammengestellten Eckdaten für 1995.

Danach würde der Energieverbrauch in den Endenergiesektoren im Jahre 1995 knapp 7 000 PJ betragen, also 670 PJ oder 9 Prozent weniger als 1987. Der Bruttostromverbrauch wird auf 1 370 PJ (gegenüber 1987 minus 3 Prozent) veranschlagt. Der Stromerzeugungsbeitrag auf Basis der Kraft-Wärme-Kopplung belief sich auf knapp 180 PJ (etwa 50 TWh), so daß die Kondensationsstromerzeugung einen Umfang von 1 175 PJ einnehmen müßte. Ohne Einsatz der Kernenergie wäre der Kondensationsstrombedarf vor allem durch Kohlen-, insbesondere (aus Emissionsgründen) aber durch bestehende sowie unter Umständen kurzfristig neu zu errichtende Gaskraftwerke zu decken, da der Beitrag der erneuerbaren Energiequellen (ohne Biomasse in KWK-Anlagen) im Jahre 1995 mit rund 80 PJ — etwa 23 TWh — noch begrenzt bleiben müßte.

Tabelle 19

**Ausgewählte Ergebnisse eines Kernenergieausstiegs  
bis zum Jahr 1995 in der Energiesystemstudie**

	1987 PJ	1995 PJ	1987/95 %
<b>Endenergiesektoren</b> . . . . .			
Private Haushalte . . . . .	2 034	1 729	- 15,0
Kleinverbraucher . . . . .	1 225	1 076	- 12,1
Industrie . . . . .	2 289	2 279	- 0,4
Verkehr . . . . .	1 991	1 907	- 4,2
nicht behandelt . . . . .	123	119	- 3,6
Subst. durch KWK . . . . .		-122	
Insgesamt . . . . .	7 661	6 989	- 8,8
<b>Kraft-Wärme-Kopplung</b> . . . . .			
Industrie . . . . .	245	345	40,6
Heizkraftwerke . . . . .	254	333	31,1
Summe KWK . . . . .	499	678	35,8
<b>Energieverbrauch insgesamt</b> . . . . .			
Steinkohlen . . . . .	1 878	2 016	7,4
Braunkohlen . . . . .	1 016	1 049	3,2
Benzin . . . . .	1 066	945	- 11,3
Heizöle . . . . .	2 995	2 557	- 14,6
Gase . . . . .	2 250	2 906	29,1
Fossil gesamt	9 204	9 472	2,9
Wasserkraft . . . . .	184	188	2,1
Kernenergie . . . . .	1 233	0	-100,0
Windenergie . . . . .	0	30	
Photovoltaik . . . . .	0	0	
Stromimportsaldo . . . . .	36	36	0,0
Summe . . . . .	10 656	9 726	- 8,7
<b>Kondensationsstrom- erzeugung</b> . . . . .			
Steinkohlen . . . . .	385	450	17,0
Braunkohlen . . . . .	276	300	8,9
Heizöle . . . . .	10	25	145,1
Gase . . . . .	77	319	3 130
Fossil gesamt	748	1 094	46,3
Wasserkraft . . . . .	74	77	4,5
Kernenergie . . . . .	470	0	-100,0
Windenergie . . . . .	0	4	
Photovoltaik . . . . .	0	0	
Summe . . . . .	1 292	1 175	- 9,0
<b>CO<sub>2</sub>-Emissionen (Mio. t)</b> . . . . .			
Endenergiesektoren . . . . .	452,8	411,2	- 9,2
KWK-Bereich . . . . .	39,9	43,6	9,2
Kondensationskraftwerke . . . . .	189,0	239,4	26,6
übrige Bereiche . . . . .	33,3	24,1	- 27,5
<b>Summe</b> . . . . .	715,0	718,2	0,5

In diesem Zusammenhang stellt sich zunächst die Frage, ob ein so kurzfristiger Ausstieg technisch überhaupt machbar sei. Im Jahre 1989 betrug die installierte Engpaßleistung der öffentlichen Kraftwerke (einschließlich Bezugsleistung) 93 200 MW. Rechnet man die vertraglich vereinbarte Lieferleistung von 1 600 MW sowie die Übertragungen mit 900 MW ab, so blieb eine Inlandsleistung von 90 700 MW. Folgt man den Angaben von Schnug (bwk, Nr.4, 1990), so war zu Zeiten der Höchstlast wegen jahreszeitlich bedingter geringer Wasserführung der Laufwasserkraftwerke, wegen des begrenzten Tagesarbeitsvermögens der Pumpspeicherwerke und wegen fernwärmebedingter Minderleistungen bei Kraft-Wärme-Kopplungsanlagen insgesamt eine Leistung in Höhe von 7 000 MW nicht einsetzbar. Außerdem mußte zum Ausgleich von Ausfällen und von Revisionen eine Reserveleistung von 11 900 MW in Anspruch genommen werden, so daß die verfügbare Leistung nur noch 71 800 MW betrug. Im Vergleich zur Höchstlast des öffentlichen Netzes (abzüglich Industrieübertragung) in Höhe von 59 400 MW ergibt sich daraus eine „freie“ Leistung von 12 400 MW. Würden bei unveränderten Bedingungen alle Kernkraftwerke mit einer im Dezember 1989 am Netz befindlichen Leistung von 18 376 MW abgeschaltet, so wäre unter den genannten Annahmen die Höchstlast von der verbleibenden Leistung also nicht mehr zu decken gewesen.

Legt man die oben erwähnten Werte für die Veränderungen des Stromverbrauchs und der zusätzlichen Stromerzeugung auf KWK-Basis zugrunde, so müßte die Höchstlast zum Beispiel durch zusätzliches Lastmanagement bis 1995 entweder entsprechend reduziert werden, oder es müßte kurzfristig entsprechende Kraftwerksleistung zugebaut werden.

Hier nicht zu werten sind insbesondere die gesamt- und einzelwirtschaftlichen Folgen dieses Weges. Dazu sei ebenfalls auf die vorliegenden früheren Ausstiegstudien verwiesen. Entsprechend der Fragestellung der Enquete-Kommission soll im folgenden lediglich auf die Implikationen hinsichtlich der CO<sub>2</sub>-Emissionen hingewiesen werden. Unter der Voraussetzung der oben angedeuteten Veränderungen von Niveau und Struktur des Energieverbrauchs würden sich die gesamten CO<sub>2</sub>-Emissionen im Jahre 1995 auf gut 718 Millionen Tonnen belaufen. Gegenüber 1987 bedeutet dies einen Anstieg von nur wenig mehr als 3 Millionen Tonnen beziehungsweise unter 1 Prozent. Die unterstellten Energieeinsparungen schlagen sich jedoch in einem Rückgang der Emissionen im Endenergiebereich nieder, und zwar um knapp 42 Millionen Tonnen oder rund 9 Prozent. Dieser Rückgang wird aber mehr als ausgeglichen durch die höheren Emissionen im KWK-Bereich (4 Millionen Tonnen beziehungsweise 9 Prozent) und insbesondere bei Kondensationskraftwerken (50 Millionen Tonnen beziehungsweise 27 Prozent). Insgesamt wird daher bei einem Ausstieg aus der Kernenergie bis zum Jahre 1995 mit einer bis dahin höheren CO<sub>2</sub>-Emissionsbelastung zu rechnen sein. Dabei dürfte es sich um eine vorübergehende Erscheinung handeln, wenn angenommen wird, daß sich nach 1995 die Veränderungen in dem durch das Ausstiegsszenario 2005 vorgezeichneten Pfad vollziehen.

### 1.3.4.2 Ausführungen des Öko-Instituts Freiburg zum Kernenergieausstieg 1995<sup>1)</sup>

Um weitere Informationen über einen Kernenergieausstieg 1995 zu erhalten, hat die Enquete-Kommission zusätzlich zu den vorhergehenden Ausführungen das Öko-Institut Freiburg beauftragt, den Kernenergieausstieg bis 1995 nach seiner Sicht durchzurechnen.

#### Die zukünftige Elektrizitätswirtschaft

Bei der Diskussion über den Ausstieg aus der Atomenergie und seiner Auswirkungen kommt dem Elektrizitätssektor eine besondere Bedeutung zu, da die Atomkraftwerke (AKW) in der Bundesrepublik Deutschland derzeit fast ausschließlich zur Stromerzeugung eingesetzt werden.

In dem Szenario wird unterstellt, daß alle Atomkraftwerke in der Bundesrepublik Deutschland bis zum Jahr 1995 stillgelegt werden. Kernenergie-Ausstiegs-Szenarien müssen drei grundsätzliche Aspekte betrachten:

1. Die technische Machbarkeit des Ausstiegs zum gewünschten Zeitpunkt,
2. die weitere Bedarfsentwicklung für Energiedienstleistungen und deren Bereitstellung sowie
3. die ökologischen Auswirkungen des Ausstiegs aus der Atomenergie.

Im folgenden werden diese drei Fragestellungen behandelt.

#### Die technische Machbarkeit des Ausstiegs aus der Atomenergie

In diesem Abschnitt wird die technische Machbarkeit dargestellt, wobei insbesondere die sichere Lastabdeckung zum Zeitpunkt der Jahreshöchstlast behandelt wird.

Die Argumentation baut auf der Höchstlastsituation des Jahres 1989 auf und beinhaltet den kritischen Zeitraum bis zum Jahr 1995. Dabei werden neben der tatsächlich aufgetretenen Situation im Jahr 1989 (1) auch die Optimierungsmöglichkeiten dargestellt, die es innerhalb der Elektrizitätswirtschaft gegeben hätte, wenn ihnen die Kernkraftwerksleistung nicht zur Verfügung gestanden hätte.

Die Realisierung dieser Optimierungsmöglichkeiten kann für den Fall unterstellt werden, daß bei einer gewollten Abschaltung der Atomkraftwerke eine sichere Lastabdeckung erfolgen soll.

Im Jahr 1989 trat in der öffentlichen Elektrizitätsversorgung eine bereinigte Jahreshöchstlast (JHL) in Höhe von 59 400 MW auf. Dieser JHL stand eine installierte Engpaßleistung der öffentlichen Kraftwerke inklusive Bezugsleistung) in Höhe von 93 200 MW gegenüber, woraus sich unter Berücksichtigung der

vorhandenen Optimierungsmöglichkeiten folgende Situation ergibt:

1. Netzhöchstlast inklusive Übertragungsleistung	60 300 MW
2. Übertragungsleistung der Industrie	-900 MW
3. Abzudeckende Jahreshöchstlast 1989	59 400 MW
4. Engpaßleistung öffentliche Kraftwerke und Bezugsleistung	93 200 MW
5. In Anspruch genommene Reserveleistung (1)	-7 700 MW
6. Nichteinsetzbare Kraftwerksleistung (2)	-6 000 MW
7. Vorzuhaltende Lieferleistung Ausland (3)	-400 MW
8. Einsetzbare Kraftwerksleistung zur Abdeckung der Jahreshöchstlast	79 100 MW
9. Freie Leistung	19 700 MW
10. Atomkraftwerksleistung am Netz	-18 376 MW
11. Reserveleistung	1 324 MW

(1) Die tatsächlich in Anspruch genommene Reserveleistung betrug 11 900 MW, wovon für ausgefallene AKW-Leistung 4 170 MW und für andere Kraftwerke 7 730 MW in Anspruch genommen wurden. In dieser Summe ist auch notwendige Reserveleistung in Höhe von 6 000 MW aufgrund geplanter Revisionen enthalten. Es wird unterstellt, daß von diesen geplanten Revisionen 70 Prozent aus der Jahreshöchstlastzeit verlagert werden können.

(2) Tatsächlich waren 1989 7 000 MW nicht einsetzbar, worin aber auch die Leistung von „Langzeitkonservierten“ Kraftwerken enthalten ist, die im Ausstiegsfall für die zeitlich befristete Abdeckung der Jahreshöchstlast eingesetzt werden können. Es wird eine Leistung in Höhe von 1 000 MW dadurch für mobilisierbar unterstellt.

(3) Es wird unterstellt, daß zum Zeitpunkt der Jahreshöchstlast die Lieferverpflichtungen ins Ausland in Höhe von 1 600 MW zu 80 Prozent erfüllt wurden. Somit sind in der Netzhöchstlast bereits 1 200 MW enthalten, und es müssen nur noch 400 MW vorgehalten werden.

Zum Zeitpunkt der Jahreshöchstlast 1989 hätte eine sichere Lastabdeckung auch ohne Atomkraftwerk erfolgen können, wenn die vorhandenen Optimierungsmöglichkeiten ausgenutzt worden wären.

Nicht mitbetrachtet wurden Lastmanagementmaßnahmen auf der Nachfrageseite, die ebenfalls zur Reduzierung der Spitzenlast beitragen können.

Die Entwicklung der Jahreshöchstlast und der Kraftwerksleistung wird für den „kritischen“ Zeitraum bis zum Jahr 1995 wie folgt ermittelt, wobei eine lineare Abschaltung der Atomkraftwerke bis zum Jahr 1995 unterstellt wird:

<sup>1)</sup> Dieser Teil wurde im Rahmen der zusammenfassenden Energiestudie (vgl. Kapitel 6) von Dipl. Ing. Kohler federführend bearbeitet.

	Höchstlast (HL) (MW)	Kraftwerks- leistung (KWL) (MW)	Differenz KWL/HL (MW)	
Winter 90/91	60 500 MW	93 200 MW	32 700	1,54
Winter 91/92	61 700 MW	88 726 MW	27 026	1,44
Winter 92/93	62 000 MW	84 252 MW	22 252	1,36
Winter 93/94	62 000 MW	79 778 MW	17 778	1,28
Winter 94/95	61 000 MW	75 304 MW	14 304	1,23
Winter 95/96	60 000 MW	70 600 MW	10 600	1,18

Die Kraftwerks- und Bezugsleistung bleibt im nicht-nuklearen Kraftwerkspark in diesem Zeitraum ungefähr konstant. Einem Abgang (bedingt auch durch die Großfeuerungsanlagenverordnung) in Höhe von rund 2 800 MW steht eine Neuinbetriebnahme von insgesamt 2 650 MW gegenüber. Somit stehen an vorhandener beziehungsweise heute in Bau befindlicher Kraftwerks- und Bezugsleistung (ohne Atomkraftwerke) der öffentlichen Versorgung insgesamt 70 600 MW im Jahr 1995 zur Verfügung.

Wie aus der dargestellten Entwicklung ersichtlich, kann eine sichere Lastabdeckung über den „kritischen Zeitraum“ der Jahre 1995 bis 1997 mit einer Differenz zwischen Kraftwerksleistung und Höchstlast von 54 bis 18 Prozent gewährleistet werden.

Es wurde bei der Lastentwicklung eine Steigerung auf 62 000 MW (92/94) unterstellt, die dann durch die Realisierung von Stromeinsparmaßnahmen auf 60 000 MW bis 1995/96 reduziert werden kann. Es wurde in der oben genannten Betrachtung auch kein Zugang an neuen KWK-Anlagen einbezogen, obwohl dies gerade im industriellen Bereich innerhalb von 2 bis 3 Jahren möglich wäre, also zum Winter 92/93, da hierbei kein Auf- oder Ausbau von Fernwärmenetzen unterstellt werden muß.

#### Zwischenbemerkung zur ehemaligen DDR

In dieser Entwicklung besteht also noch Spielraum, um die im Rahmen der geplanten und in Bau befindlichen Hochspannungstrassen diskutierten Stromlieferungen in die ehemalige DDR in Höhe von rund 4 500 MW zu erfüllen, wobei diese in dieser Größenordnung erst ab dem Winter 92/93 bzw 93/94 erforderlich werden können (Bauzeit der Trassen). Wird jedoch eine Energiepolitik wie in dem hier beschriebenen Szenario auch auf dem Gebiet der ehemaligen DDR realisiert, so kann durch die Mobilisierung der vorhandenen Stromeinsparpotentiale der Strombedarf von 120 TWh (1988) auf rund 95 TWh bis zum Jahr 2000 reduziert werden. Gleichzeitig besteht aufgrund der bereits vorhandenen Fernwärmesysteme die Möglichkeit des Zubaus von KWK-Anlagen, wobei insgesamt eine Leistung zwischen 7 500 und 9 000 MWel aufgebaut werden kann (2). Durch die gleichzeitige Modernisierung eines Teils der Braunkohlekraftwerke (rund 6 000 MWel) können die Stromlieferungen aus dem Gebiet der Bundesrepublik Deutschland (ohne ehemalige DDR) weitgehend vermieden werden.

Die technische Machbarkeit des Ausstiegs aus der Atomenergie bis zum Jahr 1995 ist diesen Ausführun-

gen zur Folge möglich. Es sind keine Einwände bekannt, die diesem Szenario die Grundlage entziehen könnten.

#### Die Entwicklung des Kraftwerksparks und der Stromerzeugung bis zum Jahr 2005

Die Kraftwerksleistung im Ausstiegsszenario entwickelt sich bis zum Jahr 2005 wie folgt:

Tabelle 20

#### Kraftwerksleistung im „Kernenergie-Ausstiegsszenario 1995“ im Jahr 2005 in Megawatt (MW)

Erzeugungs-Art	2005
Öffentl. Kond-Kraftwerke .....	24 755
– Steinkohle .....	11 755
– Braunkohle .....	0
– AKW .....	0
– Gas .....	6 000
– Öl .....	7 000
– HKW Sonstige .....	9 521
– HKW stromorientiert .....	7 839
– Industrie-Kond-Kraftwerke .....	833
– Industrie-HKW .....	13 034
Regenerative .....	18 044
– Wasser .....	7 003
– Wind .....	8 741
– Solar .....	2 300
<b>Gesamtsumme .....</b>	<b>74 025</b>
Anteil Kond. 1) .....	45,2 %
Anteil KWK 2) .....	30,5 %
Anteil Regenerative .....	24,4 %

1) = inkl. stromorientierte HKW, da Entnahme-Kond-Leistung

2) = ohne stromorientierte HKW, da Entnahme-Kond-Leistung

Bis zum Jahr 2005 findet eine erhebliche Umstrukturierung des Kraftwerksparks statt, die hauptsächlich durch den Zubau von Kraftwerksleistung im KWK-Bereich und bei regenerativen Energiequellen geprägt ist, sowie durch die Stilllegung von Kondensationskraftwerken.

Die gesamte Kraftwerksleistung kann bis zu diesem Zeitpunkt auf einen Wert von 74 000 MW reduziert werden, was mit der Höchstlastentwicklung kompatibel ist, die aufgrund von Stromeinsparpotentialen und Lastmanagementmaßnahmen auf 54 000 MW (öffentlich+industriell) reduziert werden kann. Damit ist zum Zeitpunkt der Höchstlast, ohne Wind- und Photovoltaik-Leistung sowie bei Anrechnung von 60 Prozent der Wasserkraftleistung, eine Reserveleistung von 12 Prozent vorhanden.



In Tabelle 21 wird die Stromerzeugung für die Jahre 1995 und 2005 dargestellt:

Tabelle 21

**Stromerzeugung im „Kernenergie-Ausstiegsszenario 1995“ in Terawattstunden (TWh)**

Erzeugungs-Art	1995	2005
Öffentl. Kond-KW .....	228,6	83,7
– Steinkohle .....	115,4	68,6
– Braunkohle .....	55,8	0,0
– AKW .....	0,0	0,0
– Gas .....	37,3	2,9
– Öl .....	20,2	5,3
Öffentliche KWK .....	38,3	63,0
– sonstige <sup>1)</sup> .....	27,2	35,6
davon Steinkohle .....	2,7	4,4
davon Braunkohle .....	1,4	0,9
davon Öl .....	2,0	2,7
davon Gas .....	16,1	16,6
davon übr. Festbr. ....	3,0	3,7
– stromorient. <sup>2)</sup> .....	11,1	27,4
Industrie-Kond.-KW .....	25,0	5,0
– Steinkohle .....	2,5	0,3
– Braunkohle .....	1,3	0,3
– Gas .....	16,3	3,5
– Öl .....	5,0	1,0
Industrie-KWK .....	29,4	78,2
– Steinkohle .....	7,0	24,3
– Braunkohle .....	2,3	11,4
– Erdgas .....	20,1	42,4
Regenerative .....	28,3	56,5
– Wasser .....	24,0	28,7
– Wind .....	2,3	17,8
– Solar .....	0,0	2,7
– Biogas .....	2,0	7,3
Summe Kond.-Strom .....	253,6	88,7
Summe KWK-Strom .....	67,7	141,2
Summe Regenerativ .....	28,3	56,5
<b>Gesamtsumme .....</b>	<b>349,6</b>	<b>286,4</b>
Anteil Kond.-Strom .....	72,6 %	31,0 %
Anteil KWK-Strom .....	19,4 %	49,3 %
Anteil REO-Strom .....	8,1 %	19,7 %

<sup>1)</sup> wärme-orientierte Kohle-HKW, Gas-BHKW/Gasturbinen

<sup>2)</sup> Entnahme-Kondensation mit Brennstoff Steinkohle

Die Stromerzeugung im Jahr 2005 stellt sich grundsätzlich anders dar als heute. Die KWK-Stromerzeugung hat dann einen Anteil von fast 50 Prozent, die regenerativen Energiequellen bereits 20 Prozent, und die Kondensationsstromerzeugung sinkt auf 31 Pro-

zent ab. Damit werden im Bereich der KWK-Anlagen die als wirtschaftlich ermittelten Potentiale ausgeschöpft (3), wobei die Anlagen mit einer höheren Stromkennzahl gefahren werden. Dieser Trend wird bereits im Jahr 1995 ersichtlich, besonders durch die Modernisierung von industriellen KWK-Kapazität (vor allem Erhöhung der Stromkennzahl) sowie dem Aufbau von KWK-Anlagen im Nahwärmesektor.

**Entwicklung des Endenergiebedarfs im „Kernenergie-Ausstiegsszenario 1995“**

Der sektorielle Endenergiebedarf im Ausstiegsszenario entwickelt sich wie folgt:

Tabelle 22

**Endenergiebedarf nach Sektoren im „Kernenergie-Ausstiegsszenario 1995“ in Petajoule (PJ)**

	1987	1995	2005
Kleinverbrauch .....	1 348	1 050	939
Haushalte .....	2 034	1 661	1 389
Verkehr .....	1 991	1 311	1 032
Industrie .....	2 289	2 127	1 973
Insgesamt .....	7 662	6 149	5 333
KWK-Wärme Industrie ...	245	210	551
KWK-Wärme andere .....	254	361	549

Der Endenergiebedarf reduziert sich über den Betrachtungszeitraum um 30 Prozent auf 5 333 PJ, und liegt damit nur um 7 Prozent unter dem Endenergieverbrauch des Reduktionsszenarios „Kernenergieausstieg 2005“. Bis zum Jahr 1995 kann aber bei einem unterstellten Ausstieg bereits eine Reduktion um 20 Prozent erreicht werden, die insbesondere durch den Verkehrssektor (Tempolimit, Minimierung des spezifischen Verbrauchs) und durch die forcierte Einsparung im Raumwärmebereich und im Strombereich der privaten Haushalte sowie des Kleinverbrauchs realisiert werden können. Eine besondere Bedeutung kommt bis zu diesem Zeitpunkt aber auch dem Ausbau und der Modernisierung der Nahwärme sowie der industriellen Wärmebereitstellung durch KWK-Anlagen zu. Diese Annahme ist in der Szenario-Logik stimmig, da nicht eine CO<sub>2</sub>-Reduktion in diesem Ausmaß und der Ausstieg aus der Atomenergie durchgeführt wird, also ein hohes Verantwortungsbewußtsein bei der Bevölkerung vorhanden sein muß, ohne gleichzeitig eine forcierte Energieeinsparung zu realisieren.

Zur Umsetzung der angenommenen Maßnahmen sind vor allem zielgruppenspezifische Programme notwendig, die die vorhandenen gruppenspezifischen Hemmnisse überwinden helfen. Solche Programme lassen sich im Zuge des Least-cost Planning systematisch konzipieren und umsetzen (4).

### Die Entwicklung des Primärenergiebedarfs im „Ausstiegsszenario 1995“

Die Entwicklung des Primärenergiebedarfs erfolgt wie in Tabelle 23 dargestellt:

Tabelle 23

#### Primärenergiebedarf nach Energieträgern im „Kernenergie-Ausstiegsszenario 1995“ in Petajoule (PJ)

	1987	1995	2005
Steinkohle .....	1 878	2 048	1 571
Braunkohle .....	1 016	772	235
Öl .....	4 060	3 591	2 590
Gas .....	2 250	2 015	1 708
Atomenergie .....	1 233	0	0
Wasserkraft .....	184	222	265
Solarstrom .....	0	0	25
Windenergie .....	0	21	165
reg. Energien im Endenergiebereich <sup>1)</sup> .....	135	170	335
Insgesamt .....	10 756	8 840	6 894
– fossil .....	9 204	8 427	6 104
– regenerativ .....	319	413	789

<sup>1)</sup> = inkl. Biomasse zur Stromerzeugung

Der Primärenergiebedarf reduziert sich über den Betrachtungszeitraum um 36 Prozent auf 6 894 PJ. Der Einsatz der fossilen Energieträger vermindert sich um 34 Prozent, wobei die einzelnen Energieträger unterschiedlich betroffen sind:

Der Einsatz der Steinkohle reduziert sich von 1987 bis 2005 um 17 Prozent auf 1 571 PJ, oder 53,6 Millionen Tonnen SKE. Damit wird der von der Mehrheit der Mikat-Kommission vorgeschlagene Wert in Höhe von 55 Millionen Tonnen trotz drastischer CO<sub>2</sub>-Reduktion im Szenario fast erreicht.

Der Braunkohleeinsatz vermindert sich demgegenüber im Betrachtungszeitraum auf 23 Prozent des Ausgangswertes von 1987, was insbesondere unter CO<sub>2</sub>-Reduktionsgesichtspunkten von Bedeutung ist. Die Verminderung des Braunkohleeinsatzes wurde aber auch unter dem Aspekt der Umweltschäden durch den Neuaufschluß von Braunkohletagebauen entwickelt, da bei den unterstellten Einsatzmengen ein Neuaufschluß im Szenariozeitraum unterbleiben kann.

Der Öl- und Erdgaseinsatz reduziert sich um 37 Prozent beziehungsweise 25 Prozent, wodurch die fossilen Energieträger insgesamt über den Betrachtungszeitraum um 34 Prozent vermindert werden können. Demgegenüber steigt der Einsatz der regenerativen Energiequellen auf 789 PJ und erreicht damit einen Anteil von 11 Prozent. Das hier unterstellte Potential an regenerativen Energiequellen bewegt sich damit in der gleichen Bandbreite wie im „Reduktionsszenario „Kernenergieausstieg 2005“, in dem 740 PJ unterstellt wurden.

Die größten „Gewinne“ bei der Primärenergieeinsparung resultieren aus der weitgehenden Ausnutzung der KWK-Potentiale, sowie den ehrgeizigen Maßnahmen im Verkehrsbereich.

### Die Entwicklung der CO<sub>2</sub>-Emissionen im „Ausstiegsszenario 1995“

Die durch den oben dargestellten Primärenergiebedarf bedingten CO<sub>2</sub>-Emissionen entwickeln sich im Szenariozeitraum, differenziert nach Energieträgern, wie folgt:

Tabelle 24

#### Energiebedingte CO<sub>2</sub>-Emissionen im „Kernenergie-Ausstiegsszenario 1995“ (in Millionen Tonnen)

Quelle	1987	1995	2005
Steinkohle .....		195	149
Braunkohle .....		85	26
Öl .....		269	194
Gas .....		111	94
Summe .....	715	660	463
Veränderung gegenüber 1987 .....	0 %	–8 %	–35 %

Trotz des unterstellten Ausstiegs aus der Atomenergie im Jahr 1995 können die CO<sub>2</sub>-Emissionen im selben Jahr auf 660 Millionen Tonnen reduziert werden, und liegen damit 8 Prozent unter dem Ausgangswert von 1987. Bis zum Jahr 2005 können die Emissionen um 252 Millionen Tonnen auf 463 Millionen Tonnen, also um 35 Prozent, reduziert werden.

Wie die folgende Tabelle aufzeigt, kann die Stilllegung der AKW durch die Mobilisierung der rationellen Energienutzung und der KWK-Stromerzeugung soweit kompensiert werden, daß es in keinem Jahr zu einer Überschreitung des CO<sub>2</sub>-Emissionswerts von 1987 in Höhe von 715 Millionen Tonnen kommt.

Tabelle 25

**Jährliche CO<sub>2</sub>-Emissionen im Energiebereich  
im „Kernenergie-Ausstiegsszenario 1995“**

(Millionen Tonnen)

Jahr	CO <sub>2</sub> -gesamt	
1987 . . . . .	715	kumulierte Emissionen:
1988 . . . . .	708	87–90: 2 815
1989 . . . . .	700	91–95: 3 364
1990 . . . . .	693	96–2000: 2 978
1991 . . . . .	686	2001–2005: 2 495
1992 . . . . .	679	1987–2005: 11 653
1993 . . . . .	673	
1994 . . . . .	666	
1995 . . . . .	660	
1996 . . . . .	638	
1997 . . . . .	617	
1998 . . . . .	596	
1999 . . . . .	574	
2000 . . . . .	553	
2001 . . . . .	535	
2002 . . . . .	517	
2003 . . . . .	499	
2004 . . . . .	481	
2005 . . . . .	463	

Durch die Realisierung des hier aufgezeigten „Ausstiegs-Szenarios 1995“ können die ausstiegsbedingten Mehremissionen im Zeitraum 1991 bis 2000 durch eine verstärkte Mobilisierung der Potentiale der rationalen Energiebereitstellung und -nutzung und der regenerativen Energiequellen bis 2005 fast kompensiert werden. Dagegen ist zu beachten, daß im „Energiepolitik“-Szenario im Jahr 2005 Atomkraftwerke mit einer Leistung von 23 600 MW<sub>el</sub> in Betrieb sind, die folgende Atommüllmenge in diesem Zeitraum produziert haben:

Tabelle 26

**Radioaktive Abfallmengen im Reduktionsszenario „Energiepolitik“**

Art des Abfalls	kumulierte Mengen				
	Einheit	1988	2006	2020	2050
AKW-Kapazität . . . . .	HW	22 650	23 600		
<b>1. Hochaktive Abfälle</b>					
Entlademengen					
LWR-Brennelemente . . . . .	t	5 007	16 916	26 177	46 023
Glaskokillen aus Wiederaufbereitung . .	Anzahl	3 765	12 719	19 682	34 603
<b>2. Schwach- und mittelradioaktive Abfälle</b>					
Schwachaktive Abfälle ohne WAA/HO <sub>x</sub> -Einsatz . . . . .	m <sup>3</sup>	62 521	211 223	326 863	574 663
Schwachaktive Abfälle mit WAA/HO <sub>x</sub> -Einsatz . . . . .	m <sup>3</sup>	106 465	359 682	556 601	978 569
Mittelaktive Abfälle ohne WAA/HO <sub>x</sub> -Einsatz . . . . .	m <sup>3</sup>	1 250	4 224	6 537	11 493
Mittelaktive Abfälle mit WAA/HO <sub>x</sub> -Einsatz . . . . .	m <sup>3</sup>	13 040	44 055	68 174	119 858
<b>3. Abfälle aus der Urangewinnung (Ausland)</b>					
Uranerzhalden . . . . .	1000 t	17 526	59 212	91 629	161 094
Langfristige integrierte Kollektivdosis auf Uranerzhalden . . . . .	Personen-Sievert	86 815	293 298	453 872	797 960
	Jahr	2020	2040	2060	2080
<b>4. Abfälle aus dem Abriss der Anlagen</b>					
Schwachaktive Abfälle . . . . .	m <sup>3</sup>	4 019	8 474	303 152	307 607
Mittelaktive Abfälle . . . . .	m <sup>3</sup>	1 133	2 390	85 504	86 761

Weiterhin ist das Unfallrisiko in dem „Ausstiegs-Szenario 1995“ innerhalb von fünf Jahren auf Null reduziert, während es im anderen Fall über den gesamten Zeitraum nicht reduziert wird.

**Zusatzvotum der Kommissionsmitglieder  
Dr. Lippold (Offenbach), Fellner, Frau Dr. Segall,  
Prof. Dr. Dolzer, Prof. Dr. Heinloth,  
Prof. Dr. Michaelis, Prof. Dr. Schikarski  
zu Abschnitt E, 5. Kapitel, Nr. 1.3.4.2  
„Ausführungen des Öko-Instituts Freiburg  
zum Kernenergieausstieg 1995“**

Die Kommission hatte das Öko-Institut beauftragt, in Ergänzung des Berichts „A-Gesamt“ Mittel und Wege eines Ausstiegs der Bundesrepublik aus der Kernenergie bis zum Jahre 1995 zu untersuchen. Ein Mitglied der Kommission hatte die Ausführungen im Bericht „A-Gesamt“ zu einem Ausstieg bis 1995 als unzureichend und nicht sachgerecht zurückgewiesen. Da nicht mehr ausreichend Zeit für eine kritische Stellungnahme des Koordinatoren-Teams von „A-Gesamt“ zur Verfügung steht, nehmen die Unterzeichner dieses Votums Stellung zu der Studie des Öko-Instituts.

**I. Kritische Anmerkungen zu einem Ausstieg aus  
der Kernenergie bis 2005**

Im Rahmen einer Stellungnahme zu den Ergebnissen des Studienprogramms „A-Gesamt“ (dem Zusatzvotum der Kommissionsmitglieder Schmidbauer u. a. zu Abschnitt E) wird festgestellt, daß unter den vorgegebenen Bedingungen die Bundesrepublik bis zum Jahr 2005 auf friedliche Nutzung der Kernenergie aus den folgenden sieben Gründen nicht verzichten könne:

1. In seiner Logik ist das Szenario „Ausstieg 2005“ — so der zusammenfassende Bericht über die Studien — kaum vereinbar mit den vergleichsweise moderaten Preiserhöhungen um immerhin 150 DM/t SKE des Szenarios „Energiepolitik“. Es ist konzipiert für die weit stärkeren Preiserhöhungen des ursprünglich von den Studiennehmern noch vorgesehenen, dann wohl als nicht durchsetzbar fallengelassenen Energiespar-Szenarios, das eine Preiserhöhung um etwa 440 DM/t SKE vorsieht.
2. Das Szenario „Ausstieg 2005“ ist darauf ausgerichtet, daß die Bevölkerung des Bundesgebiets bis zum Jahre 2005 von gegenwärtig 62,5 Mio. auf 60 Mio. Einwohner zurückgeht. Wir erwarten aber, daß die Bevölkerung sich bis zu diesem Jahre auf 65 Mio. Einwohner vermehrt. Dies wird einen entsprechend erhöhten Energieverbrauch zur Folge haben.
3. Nach dem Szenario „Ausstieg 2005“ soll der Energieverbrauch der privaten Haushalte zwischen 1987 und 2005 um 54 % gesenkt werden. Das könnte nur gelingen durch eine Einsparung von Energie für die Raumwärme, die das technisch mögliche Reduktionspotential, so wie es vom Öko-Institut selbst in seinem Energiewende-Szenario

2010 vom Juli 1988 ausgewiesen wird, übersteigt. Das ist vernünftigerweise nicht zu erreichen.

4. Das Szenario „Ausstieg 2005“ verlangt eine Verringerung der Braunkohleförderung im rheinischen Revier, die eine langfristige Aufrechterhaltung des Bergbaus in diesem Revier nicht mehr sinnvoll macht.
5. Das Szenario „Ausstieg 2005“ will den Erdgasverbrauch bis zum Jahr 2005 um 57 % steigern. Das wird nicht möglich sein. Die Erdgasimporte können in dieser Frist nicht in einem solchen Ausmaße erhöht werden, es sei denn, Deutschland setzt sich über die vorrangigen Bedürfnisse anderer Länder in Ost und West zur Erhöhung ihres Erdgasverbrauchs hinweg.
6. Das Szenario „Ausstieg 2005“ erfordert für die Zeit zwischen 1987 und 2005 Investitionen in Höhe von 504 Mrd. DM. Hiervon fällt etwa die Hälfte in die Verantwortung der Energiewirtschaft. Nicht gerechnet sind dabei alle gleichfalls in die Verantwortung der Energiewirtschaft fallenden Investitionen, die erforderlich sind, um 4,4 mal so viel Gas wie 1987, jährlich also zusätzlich 575 PJ = 20 Mio. t SKE = 16 Mrd. Nm<sup>3</sup> Gas, verstromen zu können.

Die Energie- und Wasserwirtschaft einschließlich des Bergbaus setzt für Investitionen neuer „Ausrüstungen“ jährlich Mittel zwischen 13 und 14 Mrd. DM ein. Es ist unrealistisch, zu erwarten oder zu verlangen, daß dieser Wirtschaftszweig bis 2005 Mittel in solcher Höhe zusätzlich aufbringt, zumal dieser Wirtschaftszweig ohnehin schon durch aufwendige Investitionen zur Erneuerung und Sanierung der Energiewirtschaft im Gebiet der DDR gefordert ist.

7. Das Szenario „Ausstieg 2005“ übersieht, daß die Öffnung der deutsch-deutschen Grenze und der Wandel in den osteuropäischen Ländern Stromlieferungen in diese Gebiete zur Folge haben wird.

Zu diesen Argumenten soll hier nicht weiter Stellung genommen werden: In einem Votum zu den Ergebnissen des Studienprogramms wird auf dieses „Szenario 2005“ eingegangen werden.

Mit Blick auf die jüngste Zuspitzung der Lage am Persischen Golf sei lediglich hinzugefügt, daß ein absehbarer Verzicht auf Kernenergie der Bundesrepublik auch die Möglichkeit nehmen würde, den Anforderungen eines von der Internationalen Energie-Agentur (IEA) in Paris gesteuerten Krisen-Managements im Falle einer Ölversorgungskrise zu genügen. Dieser Krisenmechanismus, in den die Bundesrepublik eingebunden ist, sieht umfassende Substitutionen von Öl durch andere Energieträger vor, um die erforderlichen Verringerungen des Ölverbrauchs zu ermöglichen. Er tritt in Kraft, wenn, verglichen mit einer Referenzperiode, zur ausreichenden Versorgung eines Mitgliedsstaats der IEA mit Energie 7 % fehlen. Ein Ausstieg aus der Kernenergie hätte nicht nur eine zumindest vorübergehende Erhöhung des Ölverbrauchs zur Folge, sondern auch eine Verschüttung aller in Betracht zu ziehenden Möglichkeiten zu Ölsubstitutionen. Das gilt vor allem für die Möglichkeiten, auf Erdgas auszuweichen.

**II. Kritische Anmerkungen zu dem nunmehr quantifizierten Ausstieg bis 1995**

Über die im Szenario Ausstieg 2005 geforderten Einschränkungen und Umstellungen hinausgehend, will das Öko-Institut einen Ausstieg bis 1995 vor allem erreichen durch

- weitgehende und unverzügliche Einsparungen von Energie in allen Verbrauchsbereichen und
- umfassenden und unverzüglichen Ersatz der Kernenergie durch Stromerzeugung auf der Grundlage von Erdgas, Heizöl und Steinkohle.

Zu fragen ist, ob diese Einsparungen und Umstellungen bis 1995 erreicht werden können.

Folgende Gründe sprechen – ganz eindeutig – dagegen:

1. Das Öko-Institut erachtet es für möglich, die einsetzbare Kraftwerksleistung durch Abschaltung aller Kernkraftwerke (nach dem Öko-Szenario 18 376 MW, nach BMWi und VDEW sogar 23 945 MW) zu verringern und gleichwohl noch eine Reserveleistung von 1324 MW zur Deckung der bereinigten Jahreshöchstlast von 59 400 MW zur Verfügung zu haben (Seite 4 des Szenarios).

Bei dieser Rechnung

- wird fälschlich unterstellt, daß die „geplanten Revisionen“ zu 70 % aus der Jahreshöchstlast verlagert werden können; die EVU sind ohnehin bemüht, alle geplanten Revisionen in der nachfragschwachen Zeit vorzunehmen; hier wird sich kaum mehr erreichen lassen;
- wird gefordert, auch „Langzeit-konservierte“ fossile Kraftwerke zu reaktivieren mit dem Ergebnis, die aufgrund der Großfeuerungs-Anlagen-Verordnung erreichten Minderungen der CO<sub>2</sub>- und NO<sub>x</sub>-Emissionen wieder rückgängig

zu machen; das ist möglich, aber kaum vertretbar;

- wird unterstellt, daß zum Zeitpunkt der Jahreshöchstlast Lieferverpflichtungen ins Ausland in Höhe von 1600 MW zu 80 % erfüllt wurden und demnach nur 400 MW (statt 1600 MW) vorzuhalten sind; diese Rechnung verkennt, daß die EVU der Bundesrepublik in den Westeuropäischen Verbund – die UCPTE – eingeschlossen sind und demgemäß Lieferverpflichtungen ins Ausland ohne Rücksicht auf den Zeitpunkt, d. h. unabhängig von der Jahreshöchstlast nachkommen müssen.
2. Das Öko-Szenario unterstellt weitgehend Konstanz der Höchstlast – d. h. praktisch auch Konstanz der Stromnachfrage – zwischen dem Winter 1990/91 (60 500 MW) und dem Winter 1995/96 (60 000 MW) – siehe Abschnitt 3. Mit dieser zumindest zweifelhaften Hypothese steht oder fällt aber die Möglichkeit einer Abschaltung der am Netz befindlichen Kernkraftwerke.
  3. Das Öko-Szenario meint, es bestehe noch Spielraum für Stromlieferungen in die DDR von rund 4500 MW im Rahmen der geplanten und im Bau befindlichen Hochspannungstrassen. Hierbei wird übersehen, daß darüber hinaus über bereits bestehende Trassen Strom im „Richtbetrieb“ geliefert wird, daß zudem mit Stromlieferungen in andere Länder Osteuropas zu rechnen ist und daß letztlich eine Ausgliederung der DDR aus dem osteuropäischen Verbund beabsichtigt ist, so daß Gleichrichter-Netzkupplungen an der deutsch-deutschen Grenze überflüssig werden.
  4. Gemäß dem Öko-Szenario sollen in der Zeit zwischen 1987 und 1995 – praktisch heißt dies zwischen 1990 und 1995, also binnen fünf Jahren – die Stromerzeugung nach Einsatz-Energien wie folgt umstrukturiert werden (Abschnitt IV, Tabelle 2):

Tabelle 1

**Fossile und nukleare Stromerzeugung in TWH**

Einsatzenergie	1987 a)	1995 b)	Änderung
Steinkohle c) .....	106,8	141,7	+ 32,7 %
Braunkohle .....	76,6	60,8	– 20,6 %
AKW (Kernenergie) .....	130,5	0	–100 %
Gas .....	21,5	89,8	+320 %
Öl .....	2,8	21,2	+870 %
	338,2	319,5	

a) Siehe den zusammenfassenden Bericht über die Studien, Tabelle 4.1.3–2

b) Alle Einsatzarten, auch öffentliche Kraft-Wärme-Kopplung, industrielle Kondensationskraftwerke und industrielle Kraft-Wärme-Kopplung, zusammengerechnet

c) einschließl. übrige feste Brennstoffe

Hierzu sei lediglich angemerkt:

- Eine Erhöhung der Stromerzeugung auf der Grundlage von Gas auf das 4,2fache (!) bis 1995 liegt außerhalb jeder Realisierungsmöglichkeit. Es sei daran erinnert, daß die Sowjetunion ge-

genwärtig noch nicht einmal in der Lage ist, bereits eingegangene Erdgas-Lieferverpflichtungen zu erfüllen.

- Eine Erhöhung der Stromerzeugung auf der Grundlage von Heizöl auf das 9,7fache (!) mag

realisierbar sein, läuft aber allen politischen Grundausrichtungen zuwider.

5. Auch unter Einrechnung des nicht detailliert vorliegenden Einsatzes fossiler Energieträger in der Kraft-Wärme-Kopplung des Jahres 1987 ergeben sich noch erhebliche Steigerungsraten. Auf Basis 1987 = 100 (praktisch 1990 = 100) gelangt das Öko-Szenario in Tabelle 3 (Seite 10) zu folgenden Reduktionen des Endenergiebedarfs:

Tabelle 2

### Reduktionen des Endenergiebedarfs nach Öko-Szenario

	Bis 1995	Bis 2005
Kleinverbrauch . . . . .	-22,1 %	-30,3 %
Haushalte . . . . .	-18,3 %	-31,7 %
Verkehr . . . . .	-34,2 %	-48,2 %
Industrie . . . . .	- 7,1 %	-13,8 %
Insgesamt . . . . .	-19,7 %	-30,4 %

Zu den rechnerischen Grundlagen dieser Reduktionen fehlen alle Angaben.

Das gilt auch für das Reduktionsziel 2005, das nachstehend verglichen wird mit dem entsprechenden Reduktionsziel im Ausstiegsszenario 2005 des zusammenfassenden Studienberichts.

Tabelle 3

### Endenergieverbrauch in Petajoule in 2005

	„Ist“ 1987	Szenario Ausstieg 2005 in „A-Gesamt“	Öko-Szenario 1995 für 2005
Kleinverbrauch . . . . .	1 348	691	939
Haushalte . . . . .	2 034	937	1 389
Verkehr . . . . .	1 991	1 690	1 032
Industrie . . . . .	2 289	2 255	1 973
Sonstige . . . . .	—	108	—
insgesamt . . . . .	7 662	5 680	5 333

Dies gibt Anlaß zu den folgenden Feststellungen:

- In seiner Fortschreibung bis 2005 ist das Öko-Szenario Ausstieg 1995 in jeder Hinsicht inkompatibel mit dem Ausstiegsszenario 2005 des zusammenfassenden Studienberichts — und dies, obwohl, wie es heißt, dieses Szenario in enger Kooperation mit einem der Studiennehmer, der zugleich einer der beiden Autoren des Öko-Szenarios ist, entwickelt wurde. Auffällig ist die Diskrepanz beim Verkehr.
- Ohne Rücksicht auf den oben aufgezeigten Mehreinsatz von Öl zur Elektrizitätserzeugung will das Öko-Szenario den Ölverbrauch von 1987 4060 PJ (138,6 Mio. t SKE) und 1989 4527 PJ (154,5 Mio. t SKE) bis 1995 auf 3591 (122,6 Mio. t SKE) heruntersetzen. Es fällt schwer, dies zu akzeptieren.
- Das Öko-Szenario führt für 2005 zu einem Energieverbrauch des Verkehrs, der nur 61 % des entsprechenden Wertes des Ausstiegs-Szenarios 2005 in „A-Gesamt“ erreicht. Ohne jeden Hinweis auf die Gründe und die Berechnungsgrundlagen für diese Abweichung vermag das Öko-Szenario nicht zu überzeugen.
- Vollends verwirrend ist, daß das Öko-Szenario von der bis 2005 erwarteten Gesamtreduktion des Endenergieverbrauchs um 30,4 % allein 19,7 % bis 1995 verwirklichen will. In linearer Rechnung für die Zeit 1990 bis 2005 wäre nur eine Reduktion von etwa 10 % erreicht worden.

Ganz auffällig ist dies beim Energieverbrauch der Verkehrswirtschaft. Das Öko-Institut will diesen Verbrauch in den nächsten fünf Jahren um mehr als ein

Drittel vermindern, ohne auch nur mit einem Wort zu sagen, wie dies geschehen soll.

Zur Verdeutlichung nun folgende Gegenüberstellung des erwarteten Energieverbrauchs des Verkehrs:

Tabelle 4

**Erwarteter Energieverbrauch des Verkehrs  
nach verschiedenen Szenarien**

1987 Basisjahr . . . . .	1 991 PJ
2005 nach Szenario- Energiepolitik . . . . .	2 020 PJ
2005 nach Ausstiegs- Szenario . . . . .	1 690 PJ
1995 nach Öko-Szenario . . . .	1 311 PJ
2005 nach Öko-Szenario . . . .	1 032 PJ

Alles dies nachzuvollziehen fällt schwer.

Auf der Grundlage der vorbezeichneten Annahmen erwartet das Öko-Institut, daß die energiebedingten CO<sub>2</sub>-Emissionen sich wie folgt verringern:

- bis 1995 um 8 %
- bis 2005 um 35 %

Ein weiterer Kommentar erübrigt sich.

*(Ende des Zusatzvotums)*

**1.4 Reduktionsszenario „Ausbau der  
Kernenergie“<sup>1)</sup>**

In Anbetracht der begrenzten Ressourcen beziehungsweise Aufwendungen, die zur Minderung der Treibhausgasemissionen zur Verfügung stehen und um möglichst schnell wirksam werdende Minderungen zu erreichen, kommen Kosten-Nutzen-Überlegungen beziehungsweise der Entwicklung einer effizienten Minderungsstrategie eine besondere Bedeutung zu, auch um die Volkswirtschaft angesichts der gewaltigen Umstrukturierungsaufgabe zur Erreichung einer klimaverträglichen Energieversorgung nicht unverträglich zu belasten.

Hierzu wäre die Kenntnis der unterschiedlichen spezifischen CO<sub>2</sub>-Minderungskosten, das heißt der unterschiedlichen gesamtwirtschaftlichen Kosten-Effektivitäten von Treibhausgasminderungsmaßnahmen notwendig. Im Rahmen der für die Enquete-Kommission durchgeführten Studien konnte eine derartig umfassende und konsistente Datenbasis nicht erarbeitet werden. Angaben zur Kosten-Effektivität von Treibhausgasminderungsmaßnahmen liegen nicht für alle Minderungsmöglichkeiten vor. Dennoch wird in dem im folgenden näher beschriebenen Reduktionsszenario mit Ausbau der Kernenergie der Versuch gemacht, die angestrebten Treibhausgasminderungsziele mit möglichst kosteneffektiven Maßnahmen, das heißt

möglichst geringen zusätzlichen Treibhausgasminderungsbelastungen der Volkswirtschaft, zu erreichen.

Die Beiträge der verschiedenen Optionen zur Reduktion der CO<sub>2</sub>-Emissionen in dem Reduktionsszenario mit Ausbau der Kernenergie werden im folgenden näher beschrieben:

**Rationelle Energienutzung**

Im Sinne einer effizienzorientierten CO<sub>2</sub>-Minderungsstrategie sind alle Möglichkeiten der rationellen Energienutzung zu berücksichtigen, die im Rahmen der zukünftig erwarteten Energiepreisentwicklung ohne zusätzliche Kosten durchzuführen sind. Das Reduktionsszenario mit Ausbau der Kernenergie geht deshalb für die rationelle Energienutzung in den verschiedenen Bereichen des Endenergieverbrauchs von den Werten der in Kapitel 4 Nr.2 beschriebenen Hemmnisabbauvariante aus. Sie unterstellt damit erhebliche energiepolitische Anstrengungen zur Ausschöpfung bestehender, aus volkswirtschaftlicher Sicht rentabler Energieeinsparmöglichkeiten.

Für den Energieverbrauch der Sektoren private Haushalte, Kleinverbraucher, Industrie und Verkehr ergibt sich dabei die folgende Entwicklung (vgl. Tab. 27).

- Im Raumwärmebereich der Haushalte nimmt der Bedarf um 460 PJ (temperaturbereinigt), bei den Elektrogeräten um 43 PJ und bei der Warmwassererzeugung der privaten Haushalte um 46 PJ ab. Insgesamt beträgt der Rückgang 27 Prozent.
- Infolge des unterstellten Wirtschaftswachstums von insgesamt gut 50 Prozent nimmt der Energiebedarf trotz der rationellen Energienutzung im Kleinverbrauchssektor nur um 85 PJ (6,9 Prozent) ab, bei der Industrie aber um 241 PJ (10,5 Prozent) zu.
- Im Verkehrsbereich wird unterstellt, daß die technischen Energieeinsparmöglichkeiten an den Fahrzeugen genutzt werden und daß eine Verlagerung der Verkehrsanteile zugunsten öffentlicher Personen- und Gütertransportsysteme (mit Ausnahme des Flugverkehrs) stattfindet. So kommt es trotz einer weiteren Zunahme des Individualverkehrs nur zu einem Energiemehrverbrauch von knapp 30 PJ (2 Prozent).

Insgesamt ergibt sich ein Rückgang des Energieverbrauchs der Endverbrauchersektoren durch rationelle Energienutzung um 353 PJ oder rund 5 Prozent gegenüber 1987. Für die durch eine Hemmnis-Abbaupolitik unterstützte Ausschöpfung der wirtschaftlichen Potentiale einer rationellen Energienutzung insgesamt erzielbaren Energieverbrauchsminderungen wird unterstellt, daß damit eine Kosteneinsparung von rund 2700 Millionen DM/a verbunden ist.

**Kraft-Wärme-Kopplung**

Durch eine Ausweitung der Kraft-Wärme-Kopplung im Industriebereich sowie im Rahmen der Fernwärmeversorgung werden die Endenergiesektoren um einen fossilen Brennstoffverbrauch von 171 PJ entlastet.

<sup>1)</sup> Dieser Teil wurde im Rahmen der zusammenfassenden Energiestudie (vgl. Kapitel 6) von Prof. Dr. Voß federführend bearbeitet.

Tabelle 27

**Zusammenstellung der emissionsmindernden Maßnahmen in den Endenergiesektoren und im KWK-Bereich für das Reduktionsszenario „Ausbau der Kernenergie“ im Jahr 2005 in Petajoule (PJ)**

Sektoren	Energieverbr. 1987	Änderungen 1987 gegenüber 2005 durch				Resultierender Energieverbrauch 2005 <sup>7)</sup>
		ratio. Enverw.	erneuerb. Enquellen	substit. foss. En.	Kernenergie	
Private Haushalte <sup>1)</sup> .....	2 034	-549	- 57	- 11	-	1 417
Kleinverbraucher .....	1 225	- 85	- 51	- 9	-	1 080
Industrie <sup>2)</sup> .....	2 289	+241	- 11	- 4	-	2 514
Verkehr <sup>3)</sup> .....	1 991	+ 29	-	-	-	2 020
nicht behandelt <sup>4)</sup> .....	123	+ 10	-	-	-	133
<b>Summe Endenergieverbrauch</b> .....	<b>7 661</b>	<b>-353</b>	<b>-119</b>	<b>- 24</b>	<b>-</b>	<b>7 166</b>
davon:						
- Steinkohlen .....	649	- 25	- 1	- 32	-	591
- Braunkohlen .....	169	- 44	- 1	- 19	-	105
- Benzin .....	1 066	-260	-	-	-	806
- HEL <sup>5)</sup> .....	2 550	- 76	- 83	-594	-	1 797
- HS .....	297	- 4	- 3	- 4	-	286
- Gase .....	1 581	- 65	- 29	+625	-	2 112
- Fernwärme <sup>6)</sup> .....	195	- 22	-	-	-	173
- Strom .....	1 156	+142	- 2	-	-	1 296
<b>Kraft-Wärme-Kopplung</b>						
- Industrie .....	245	+ 99	-	-	-318	26
- Heizkraftwerke .....	254	+132	- 94	- 1	-125	166
<b>Summe KWK</b> .....	<b>499</b>	<b>+231</b>	<b>- 94</b>	<b>- 1</b>	<b>-443</b>	<b>192</b>

1) Endenergieverbrauch 1987 temperaturbereinigt

2) Energieverbrauch einschl. Brennstoffe für eigenerzeugten und selbstverbrauchten Strom

3) Einschließlich Treibstoffverbrauch für internationalen Flugverkehr (1987 = 120 PJ)

4) Dezentrale Warmwasserversorgung mit Holz und Gas, Kraft- und Treibstoffe für Militär und Landwirtschaft, Strom für Wärme im Verkehr, Strom für Kleingeräte und Lüftung im Haushalt

5) Heizöl, extra leicht einschl. Diesel- und Flugtreibstoffe

6) Fernwärme ohne zusätzliche nukleare und KWK-Fern- und Nahwärmebereitstellung

7) Nicht enthalten sind die erneuerbaren Energiequellen

Diese Brennstoffeinsparung resultiert dabei aus dem höheren energetischen Nutzungsgrad der Kraft-Wärme-Kopplung, zum großen Teil aber aus der CO<sub>2</sub>-freien Erzeugung von Strom und Wärme in KWK-Anlagen auf der Basis von Kernenergie und Biomasse. Die Stromerzeugung durch Kraft-Wärme-Kopplung ist im Jahr 2005 mit 170 PJ (47 TWh) etwa 1,6mal so hoch wie 1987.

### Erneuerbare Energiequellen

Bei der verstärkten Nutzung der erneuerbaren Energiequellen wurde für das Reduktionsszenario mit Ausbau der Kernenergie unterstellt, daß nur wirtschaftliche Maßnahmen bis zum Jahr 2005 verwirklicht werden. Es werden im Endenergiebereich rund 119 PJ an fossilen Brennstoffen und Strom eingespart, wobei hiervon 57 PJ auf die Haushalte, 51 PJ auf die Kleinverbraucher und 11 PJ auf die Industrie entfallen. Ins-

gesamt werden durch eine verstärkte Nutzung erneuerbarer Energiequellen rund 13 Millionen Tonnen CO<sub>2</sub> nicht emittiert, wobei Gesamtkosten in Höhe von 524 Millionen DM/a anfallen. Des weiteren wird eine Erhöhung der Stromerzeugung gegenüber dem Referenzfall um 2,8 TWh/a aus Wasserkraft, Windenergie, Photovoltaik und Biomasse unterstellt. Dadurch wird eine CO<sub>2</sub>-Minderung um 2,7 Millionen Tonnen erreicht. Darüber hinaus steigt die Wärmeerzeugung in Biomasse-KWK-Anlagen, was zu einer weiteren Verminderung der CO<sub>2</sub>-Emissionen um 5,4 Millionen Tonnen führt.

### Nutzung der Kernenergie

Kernenergie kann im Zeitraum bis zum Jahr 2005 zur Minderung von CO<sub>2</sub>-Emissionen in den Bereichen Strom- und Fernwärmeversorgung sowie in der industriellen Prozeßdampf- beziehungsweise Prozeß-



Tabelle 28

**Struktur der Stromerzeugung und des Brennstoffeinsatzes im Jahre 1987 und 2005  
im Reduktionsszenario „Ausbau der Kernenergie“**

Energieträger	Stromerzeugung (TWh)		Brennstoffeinsatz (PJ)	
	1987	2005	1987	2005
Steinkohlen .....	106,8	46,7	973,3	425,1
Braunkohlen .....	76,6	29,0	784,2	297,4
Heizöle .....	2,8	—	25,5	—
Gase .....	21,5	22,1	169,7	169,7
<b>Summe fossiler Brennstoffe .....</b>	<b>207,7</b>	<b>97,8</b>	<b>1 952,7</b>	<b>892,2</b>
Wasserkraft .....	20,6	23,6	184,0	213,7
Kernenergie .....	130,5	254,3	1 232,7	2 298,1
Windenergie .....	—	1,4	—	12,3
Photovoltaik .....	—	0,0	—	0,3
<b>Zwischensumme .....</b>	<b>358,8</b>	<b>377,1</b>	<b>3 369,4</b>	<b>3 416,6</b>
Sonstiges <sup>1)</sup> .....	59,4	77,9		
<b>Bruttostromerzeugung .....</b>	<b>418,3</b>	<b>455,0</b>		

<sup>1)</sup> Restliche Erzeugung einschließlich Kraft-Wärme-Kopplung

wärmeversorgung beitragen. Im Rahmen des Reduktionsszenarios mit Ausbau der Kernenergie wird unterstellt, daß sich die installierte Bruttoengpaßleistung der Kernkraftwerke zur Stromerzeugung von heute 23,6 GW<sub>el</sub> auf 36,6 GW<sub>el</sub> im Jahr 2005 erhöht (Zubau von insgesamt zehn 1300 MW<sub>el</sub> Kernkraftwerken). Bei einer durchschnittlichen Auslastung von 6950 Stunden/a würden diese Kernkraftwerke mit 915 PJ (254 TWh) zu rund 56 Prozent zur gesamten Stromerzeugung im Jahr 2005 beitragen. Die Ausweitung der Kernenergiestromerzeugung hat eine Minderung der CO<sub>2</sub>-Emissionen in Höhe von 92 Millionen Tonnen zur Folge. Im Rahmen der getroffenen Annahmen wäre, aufgrund des Kostenvorteils des Kernenergiestroms gegenüber der zukünftigen Stromerzeugung mittels Braunkohle und importierter Steinkohle, diese CO<sub>2</sub>-Minderung auch mit einer Reduktion der gesamten Stromerzeugungskosten von rund 560 Millionen DM/a verbunden.

Die sich im Reduktionsszenario mit Ausbau der Kernenergie ergebende Struktur der Stromerzeugung und des Brennstoffeinsatzes im Jahr 2005 ist in Tabelle 28 der des Jahres 1987 gegenübergestellt. Der Einsatz von Stein- beziehungsweise Braunkohle geht dabei

zusammen um fast 60 Prozent zurück. Die Zuordnung des Rückgangs der Kohlestromerzeugung auf die Stein- und auf die Braunkohle ist hier eine reine Rechenannahme. Sie kann natürlich unter Hinzuziehung weiterer Kriterien anders ausfallen.

Über den Einsatz zur Stromerzeugung hinaus bestehen noch wirtschaftliche Einsatzmöglichkeiten der Kernenergie bei der Auskopplung von Fernwärme aus großen Kernkraftwerken und beim Einsatz von Kernheizwerken zur Fernwärmeerzeugung in der Grundlast. Hier könnten insgesamt 137,7 PJ Fernwärme erzeugt werden, wobei dies zu einer Minderung der CO<sub>2</sub>-Emissionen um 12,6 Millionen Tonnen (einschließlich der Stromsubstitution) bei einer Kosteneinsparung von rund 230 Millionen DM/a führen würde. Schließlich können, nach den vorliegenden Untersuchungsergebnissen, durch den Einsatz des Hochtemperaturreaktors zur industriellen Prozeßdampferzeugung rund 24 Millionen Tonnen CO<sub>2</sub> ohne Zusatzkosten gemindert werden. Hierzu müßten 30 Doppelblockanlagen zu je 2 x 200 MW<sub>th</sub> insgesamt installiert werden. Die Kosteneinsparung würde sich, ermittelt anhand der vorliegenden Wirtschaftlichkeitsdaten, auf etwa 625 Millionen DM/a belaufen.

**Austausch fossiler Energieträger untereinander**

Durch einen verstärkten Einsatz des C-armen fossilen Energieträgers Erdgas lassen sich weitere Minderungen der CO<sub>2</sub>-Emissionen erzielen. Ausgehend von einer verfügbaren Erdgasmenge von 2500 PJ im Jahr 2005 kann vor allem in den Bereichen der Raumwärmeversorgung der privaten Haushalte, im Kleinverbrauchssektor, in der Industrie und in der Fernwärmeerzeugung eine über den Referenzfall hinausgehende Nutzung von Erdgas im Rahmen der unterstellten Energiepreisentwicklung als wirtschaftlich angesehen werden. Diese verstärkte Erdgasnutzung würde insgesamt zu einer Minderung der CO<sub>2</sub>-Emissionen von 16 Millionen Tonnen bei den unterstellten Energiepreisentwicklungen zu einer Einsparung von rund 1000 Millionen DM/a führen.

Tabelle 29

**Energieverbrauch nach Energieträgern<sup>1)</sup> im Jahre 1987 und 2005 im Reduktionsszenario  
„Ausbau der Kernenergie“**

Energieträger	1987		2005 <sup>2)</sup>		1987/2005 %
	PJ	%	PJ	%	
Steinkohle .....	1 866	17,1	1 092	11,0	-41,5
Braunkohle .....	999	9,2	453	4,6	-54,7
Mineralölprodukte .....	4 114	37,9	2 725	27,5	-33,8
Gase .....	2 307	21,3	2 620	26,4	13,6
<b>Summe fossiler Brennstoffe .....</b>	<b>9 288</b>	<b>85,5</b>	<b>6 890</b>	<b>69,5</b>	<b>-25,8</b>
Wasserkraft .....	184	1,7	214	2,2	16,3
Kernenergie .....	1 233	11,4	2 439	24,6	97,8
Windenergie .....	0	0,0	12,3	0,1	
Photovoltaik .....	0	0,0	0,3	0,0	
Sonstige erneuerbare Energiequellen ..	107	1,0	320	3,2	199,1
Stromimportsaldo etc. ....	36	0,3	34,2	0,4	- 5,0
<b>Gesamtsumme<sup>3)</sup> .....</b>	<b>10 846</b>	<b>100,0</b>	<b>9 909,8</b>	<b>100,0</b>	<b>- 8,6</b>

1) Abweichungen vom Primärenergieverbrauch bedingt u. a. durch Nichtberücksichtigung des nichtenergetischen Verbrauchs, des sonstigen Außenhandelsaldos usw.

2) Gegenüber 1987 werden 213 PJ Brennstoff und Strom durch erneuerbare Energiequellen substituiert.

3) ohne Berücksichtigung von energiebewußtem Verhalten

Der sich infolge der im Reduktionsszenario mit Ausbau der Kernenergie durchgeführten Maßnahmen ergebende gesamte Energiebedarf nach Energieträgern ist in Tabelle 30 mit den Werten des Jahres 1987 verglichen. Es erfolgt eine deutliche Verschiebung der Energieträgeranteile von den fossilen Brennstoffen hin zur Kernenergie. Der Anteil der erneuerbaren Energiequellen erhöht sich auf 5,5 Prozent (1987 rund 3 Prozent).

Insgesamt ergeben sich im Reduktionsszenario mit Ausbau der Kernenergie CO<sub>2</sub>-Emissionen im Jahr

2005 in der Bundesrepublik Deutschland (ohne ehemalige DDR) in Höhe von 495 Millionen Tonnen (vgl. Tab. 30). Dies entspricht einer Minderung der CO<sub>2</sub>-Emissionen um 31 Prozent gegenüber denen des Jahres 1987. Der Beitrag der einzelnen Maßnahmen zur Minderung der CO<sub>2</sub>-Emissionen und die daraus resultierenden Kosteneinsparungen sind in Abbildung 1 noch einmal im Vergleich zur Trendentwicklung und der „frozen efficiency“ Entwicklung dargestellt.

Die Minderung der CO<sub>2</sub>-Emissionen im Reduktionsszenario mit Ausbau der Kernenergie wäre, wenn

Tabelle 30

**Verbrauch von fossilen Energieträgern und Kernbrennstoffen sowie Emissionen im Jahre 1987 und 2005  
im Reduktionsszenario „Ausbau der Kernenergie“**

Sektoren	Brennstoffe		Emissionen 2005			
	1987 in PJ	2005 in PJ	CO <sub>2</sub> (Mio. t)	CH <sub>4</sub> (1000 t)	NM VOC (1000 t)	NO <sub>x</sub> (1000 t)
<b>Endenergiesektoren</b>						
Private Haushalte .....	1 615	1 029	62,4	2,4	1,7	36,0
Kleinverbraucher .....	870	727	40,0	2,1	4,5	24,8
Industrie .....	1 782	1 891	143,5	3,4	3,5	144,1
Verkehr .....	1 961	1 968	143,5	16,1	186,3	911,1
nicht behandelt .....	83	82	5,4	0,5	2,4	15,7
Brennstoff-Substitution durch KWK .....	-0	-171	-11,7	-0,3	-0,1	-3,6
<b>Summe Endenergie-Sektoren .....</b>	<b>6 311</b>	<b>5 526</b>	<b>383,1</b>	<b>24,2</b>	<b>198,2</b>	<b>1 128,1</b>
<b>Umwandlungssektoren</b>						
KWK und Heizwerke						
– fossile .....	499	237	16,3	7,0	2,0	28,1
– Kernenergie .....	–	141	–	–	–	–
Brennstoffe Kond.-Kraftwerke						
– Steinkohle .....	973	425	39,2	0,2	0,4	28,1
– Braunkohle .....	784	297	33,3	0,1	0,3	24,1
– Gas .....	170	170	9,3	0,1	0,2	4,8
– Kernenergie <sup>1)</sup> .....	1 233	2 298	–	–	–	–
Eigenverbrauch sonstiger						
Umwandlungssektoren .....	404	193	11,9	1 094,0 <sup>2)</sup>	0,2	13,4
Transportverluste .....	38	42	2,3	5,4	0,1	1,3
<b>Summe der Emissionen<sup>3)</sup> .....</b>			<b>495,4</b>	<b>1 131,0</b>	<b>201,4</b>	<b>1 227,9</b>
<b>Reduktion 1987/2005<sup>3)</sup></b>						
– absolut .....			-220,5	-668,0	-1 328,6	-1 372,1
– in % .....			- 30,8%	- 40,9%	- 86,6%	- 52,8%

<sup>1)</sup> ermittelt nach dem Substitutionsprinzip

<sup>2)</sup> einschließlich vorgelagerter Emissionen, ohne Deponien (660 kt)

<sup>3)</sup> Ohne Berücksichtigung von energiebewußtem Verhalten

man von der unterstellten Energiepreisentwicklung und den Kostendaten der Minderungsmaßnahmen ausgeht, gleichzeitig mit einer Kostenentlastung der Volkswirtschaft der Bundesrepublik Deutschland (ohne ehemalige DDR) von rund 4,6 Milliarden DM/pro Jahr verbunden (vgl. Tab. 31). Unter Berücksichtigung der Unsicherheit der Kostendaten und der zukünftigen Energiepreisentwicklung weist dieses Ergebnis bei vorsichtiger Wertung darauf hin, daß nennenswerte CO<sub>2</sub>-Minderungen ohne zusätzliche Kostenbelastungen möglich erscheinen.

Mit der Minderung der CO<sub>2</sub>-Emissionen ist auch im Reduktionsszenario mit Ausbau der Kernenergie eine Verminderung der übrigen klimarelevanten Spurengase verbunden (vgl. Tab. 30). Dabei werden insgesamt die CH<sub>4</sub>-Emissionen des Energiesektors um

41 Prozent, die NMVOC-Emissionen um 87 Prozent und die NO<sub>x</sub>-Emissionen um 53 Prozent gegenüber 1987 reduziert.

Eine über die zuvor erläuterte Reduktion hinausgehende Minderung der Emissionen von Kohlendioxid und anderen Treibhausgasen erscheint möglich, wenn weitere Maßnahmen durchgeführt würden. Unterstellt man wie in der „Energiespar“-Variante (vgl. Kapitel 4, Nr. 2) eine durch verkehrspolitische Maßnahmen verminderte Personenverkehrsleistung und verstärkte Energieeinsparungen sowie eine Ausweitung der Nutzung der erneuerbaren Energiequellen und eine höhere Verfügbarkeit von Erdgas, so ließen sich die CO<sub>2</sub>-Emissionen bis zum Jahr 2005 um weitere 65 Millionen Tonnen reduzieren. Damit würden die gesamten energiebedingten CO<sub>2</sub>-Emissionen ei-

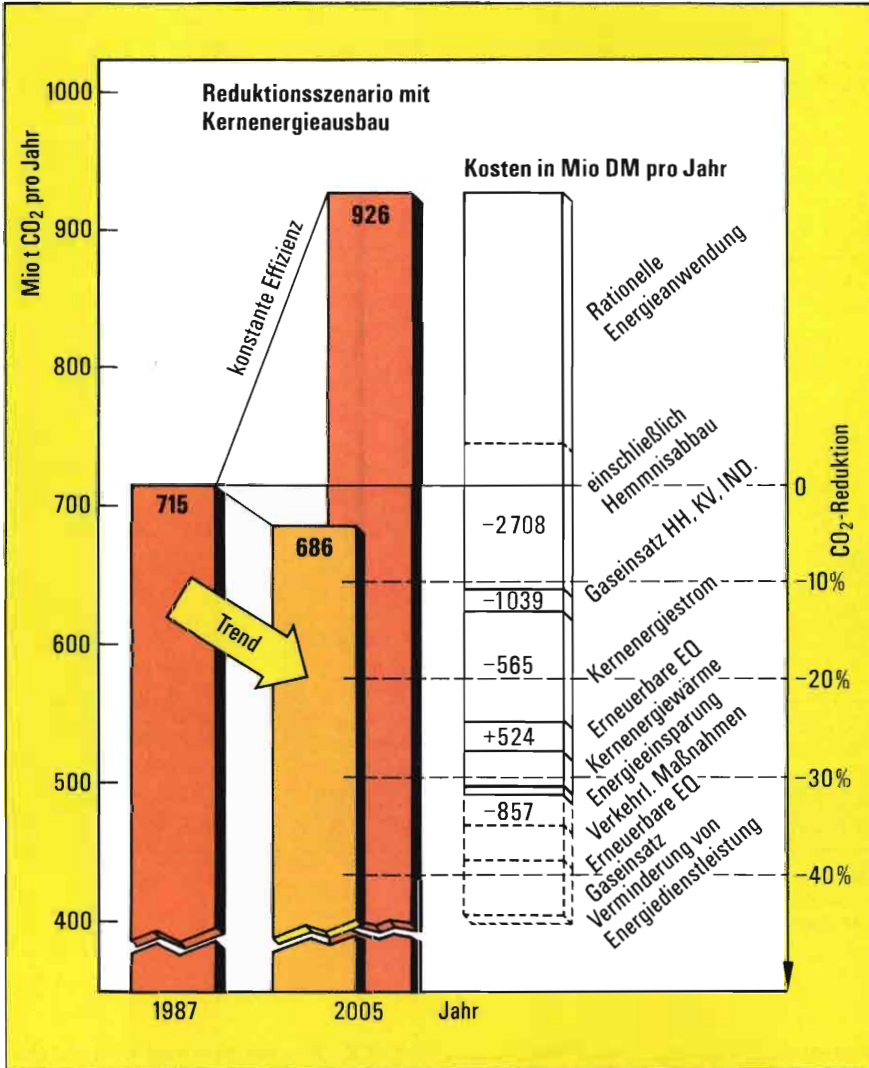


Abb. 1: Beitrag der emissionsmindernden Maßnahmen zur CO<sub>2</sub>-Minderung im Reduktionsszenario „Ausbau der Kernenergie“ und deren Kosten

nen Wert von rund 430 Millionen Tonnen pro Jahr erreichen. Dies entspricht einer Minderung der CO<sub>2</sub>-Emissionen um 40 Prozent gegenüber 1987 (vgl. Abb. 1). Eine kostenmäßige Bewertung dieser zusätzlichen Minderung ist derzeit nicht möglich. Die Pro-Kopf-CO<sub>2</sub>-Emissionen würden von 11,7 Tonnen CO<sub>2</sub> pro Jahr im Jahr 1987 auf 7,2 Tonnen CO<sub>2</sub> pro Jahr absinken. Eine weitere Minderung wäre durch energiebewußtes Verhalten beziehungsweise Verminderung von Energiedienstleistungen denkbar. Sie wird hier pauschal mit 5 Prozent, also in der Größenordnung von 20 bis 25 Millionen Tonnen CO<sub>2</sub>/a angesetzt. Damit ergibt sich bei einer Kombination dieser Minderungsmöglichkeiten ein unteres CO<sub>2</sub>-Emissionsniveau von knapp über 400 Millionen Tonnen CO<sub>2</sub>/a im Jahr 2005.

Tabelle 31

**Jährliche Nettokosten des Reduktionsszenarios  
mit Ausbau der Kernenergie im Jahr 2005  
in Millionen DM pro Jahr**

Einsparung durch:	Nettokosten
<b>Rationelle Energieverwendung<sup>1)</sup></b>	
– Private Haushalte	
– Raumwärme . . . . .	– 267 Mio. DM/a
– Elektrogeräte . . . . .	– 1 937 Mio. DM/a
– Kleinverbraucher . . . . .	– 160 Mio. DM/a
– KWK, Heizkraftwerke und Fernwärme . . . . .	– 420 Mio. DM/a
– Raffinerien . . . . .	– 67 Mio. DM/a
<b>Zwischensumme . . . . .</b>	<b>– 2 851 Mio. DM/a</b>
<b>Erneuerbare Energiequellen</b>	
– thermische Kollektoren in HH u. KV . . . . .	– 102 Mio. DM/a
– regenerative Nahwärme . . . . .	– 179 Mio. DM/a
– Wärmepumpen . . . . .	+ 804 Mio. DM/a
– Stromerzeugung . . . . .	keine Angabe
– Biomasse-KWK . . . . .	keine Angabe
<b>Zwischensumme . . . . .</b>	<b>+ 524 Mio. DM/a</b>
<b>Gaseinsatz</b>	
– Haushalte . . . . .	– 276 Mio. DM/a
– Kleinverbraucher . . . . .	– 108 Mio. DM/a
– Industrie . . . . .	– 321 Mio. DM/a
– Kraft-Wärme-Kopplung . . . . .	– 334 Mio. DM/a
<b>Zwischensumme . . . . .</b>	<b>– 1 039 Mio. DM/a</b>
<b>Kernenergie</b>	
– Stromerzeugung . . . . .	– 565 Mio. DM/a
– Nukleare Fernwärme . . . . .	– 232 Mio. DM/a
– Nuklearer Prozeßdampf . . . . .	– 625 Mio. DM/a
<b>Zwischensumme . . . . .</b>	<b>– 1 422 Mio. DM/a</b>
<b>Gesamtsumme . . . . .</b>	<b>– 4 788 Mio. DM/a</b>

<sup>1)</sup> Angaben entsprechen Nr. 1.2

## 2. Reduktionsszenarien im Vergleich<sup>1)</sup>

### Vorbemerkung

Die in der folgenden Ziffer 2 aufgeführten Passagen entsprechen in ihrer Bewertung in einigen Punkten nicht der Auffassung der Kommission.

### 2.1 Überblick und Abgrenzung

4 Prozent des weltweit jährlich emittierten CO<sub>2</sub> (20 Milliarden Tonnen von 500 Milliarden Tonnen) sind anthropogenen Ursprungs, das heißt vom Menschen verursacht. Das Ausgangsniveau bundesdeutscher anthropogener CO<sub>2</sub>-Emissionen beträgt aktuellen Schätzungen entsprechend für das Jahr 1987 706 Millionen Tonnen/a (einschließlich Luftverkehr 715 Millionen Tonnen CO<sub>2</sub>/a), was einem Anteil von ca. 3,5 Prozent bezogen auf das weltweite Emissionsvolumen entspricht. Vor diesem Hintergrund werden heute CO<sub>2</sub>-Reduzierungsziele bis zum Jahr 2005 in der Größenordnung von 20–30 Prozent (und sogar darüber hinaus) diskutiert.

Die angestrebte CO<sub>2</sub>-Minderung orientiert sich zwar am Basiswert 1987, die Größenordnung des Anpassungsbedarfs ist jedoch nur vor dem Hintergrund der bis 2005 ohne explizite CO<sub>2</sub>-Minderungsmaßnahmen zu erwartenden Entwicklung mit bestimmten für Angebot und Nachfrage als relevant erachteten Annahmen zu bestimmen. Jede diesbezügliche Aussage besitzt damit prognostischen Charakter: Entwicklungsverlauf insgesamt wie im Detail sind dementsprechend als eine Funktion der jeweils getroffenen Annahmen anzusehen, ein Umstand, auf dessen Bedeutung für die im einzelnen noch zu diskutierenden CO<sub>2</sub>-Minderungsoptionen noch einzugehen sein wird. Gleichwohl muß als Basis einer Analyse der mit einzelnen CO<sub>2</sub>-Minderungsoptionen verbundenen Voraussetzungen und Möglichkeiten zunächst eine Referenzentwicklung definiert werden. Diese – im folgenden „Trend“ genannte Entwicklung geht von bestimmten Basisannahmen unter anderem über Bevölkerung, Wirtschaftswachstum und -struktur, Energiepreisverlauf und Energiepolitik aus und berücksichtigt auch heute bereits erkennbare Sättigungsphänomene und strukturelle Veränderungen.

Der entscheidende Unterschied zu den Annahmen der „frozen efficiency“ besteht dabei einmal in der Berücksichtigung des technischen Fortschritts: Der Stand der Technik wird als Festwert bis 2005 festgeschrieben. Darüber hinaus bleibt der Energiepreisverlauf ohne Berücksichtigung und die Energieträgerstruktur ändert sich nicht. Da ein Großteil des bereits in der Vergangenheit erreichten technischen Fortschritts sich nur über die Erneuerung des volkswirtschaftlichen Kapitalstocks sukzessive im Zeitablauf, das heißt auch in den nächsten Jahren durch den Ersatz vorhandener Geräte und Produktionsanlagen durchsetzt und auch die bereits in der Vergangenheit ergriffenen einsparpolitischen Maßnahmen in der Zu-

<sup>1)</sup> Dieser Teil wurde im Rahmen der zusammenfassenden Energiestudie (vgl. Kapitel 6) von Prof. Dr. Schmitt federführend bearbeitet.

kunft fortwirken, ist dies eine rein hypothetische Annahmenkonstellation, die lediglich die Wirkungsrichtung und Bedeutung des technischen Fortschritts im Hinblick auf CO<sub>2</sub>-Emissionen zu verdeutlichen vermag. Während unter den hier im einzelnen getroffenen Annahmen bei „frozen efficiency“ mit einem Anstieg der CO<sub>2</sub>-Emissionen auf 920 Millionen Tonnen im Jahr 2005 gerechnet werden müßte, ergibt die Fortschreibung der gegenwärtigen Entwicklung (Trend) eine Verminderung um ca. 4 Prozent (auf ca. 680 Millionen Tonnen). Emissionsminderungsziele von 20 bis 30 Prozent werden allerdings weit verfehlt. Gleichzeitig ist jedoch eine systemimmanente Tendenz zur Emissionsminderung bei gleichzeitigem Wirtschaftswachstum festzustellen. Ein Bruttosozialproduktsanstieg und eine CO<sub>2</sub>-Reduzierung schließen sich demnach durchaus nicht grundsätzlich aus. Es spricht jedoch viel für die Annahme, daß eine zunehmend stärkere Beeinträchtigung des Wachstumszieles mit der Formulierung anspruchsvollerer CO<sub>2</sub>-Minderungsziele und der hierfür zunehmend erforderlichen energie- und umweltpolitischen Eingriffe verbunden wäre, wenn auch die komplexen hiermit aufgeworfenen Fragen im Rahmen dieser Untersuchung nicht bewertet werden konnten. Allerdings könnte sich das CO<sub>2</sub>-Problem als entscheidende Restriktion für weiteres Wirtschaftswachstum weltweit erweisen, sofern die befürchteten Klimaauswirkungen entsprechend bewertet werden, es sei denn es gelingt, den eingeleiteten Abkoppelungsprozeß der CO<sub>2</sub>-Emissionen vom Wirtschaftswachstum weiterhin fortzusetzen und/oder zunehmend auf CO<sub>2</sub>-freie (/ -arme) Energieversorgungstechnologien überzugehen.

Damit wird deutlich, daß schon zur Erzielung von CO<sub>2</sub>-Reduktionszielen in der Größenordnung von 20 bis 30 Prozent (und erst recht für noch weitergehende Ziele) detaillierte, letztlich im politischen Raum zu bestimmende Reduktionsstrategien formuliert und auch durchgesetzt werden müssen.

Solche Strategien sind auf die jeweiligen Ziele konkret ausgerichtete Maßnahmenbündel mit Vollzugscharakter und detaillierte Vorstellungen über deren Durchsetzung und Kontrolle.

Grundlage für die Entwicklung derartiger Strategien sind neben der Evaluierung der zu ihrer Umsetzung erforderlichen Maßnahmen Kenntnisse über Art, Ausrichtung und Zielbeitrag der zur Verfügung stehenden Handlungsoptionen sowie deren Kosten und „trade offs“. Aus diesem Grunde wurden aus dem großen Spektrum denkbarer Optionen den Vorgaben der Kommission entsprechend folgende für besonders re-

levant erachtete Varianten ausgewählt und unter bestimmten gemeinsamen Basisannahmen analysiert.

I. Reduktionsszenario „Energiepolitik“ mit den beiden Stufen „Hemmnisabbau“ und „Energiepolitik“

II. Reduktionsszenario „Kernenergieausstieg“

III. Reduktionsszenario „Kernenergieausbau“

Zu I.: Im Rahmen dieser Variante wird analysiert, welche CO<sub>2</sub>-Minderung bei konstanter Kernkraftwerkskapazität erzielt werden kann, wenn mit Hilfe energiepolitischer Maßnahmen die einer wirtschaftlichen Nutzung des gegebenen Einsparpotentials sowie der regenerativen Energiequellen entgegenstehenden Hemmnisse abgebaut (I.1) beziehungsweise weitere energiepolitische Maßnahmen ergriffen und vor allem zusätzlich durch Steuern oder Abgaben die Energiepreise um 5 DM/GJ sowie 2 Pf/kWh erhöht werden (I.2)<sup>1)</sup>.

Stufe I.1 ist unter Berücksichtigung in der Realität vorliegender Faktoren sowie der Notwendigkeit einer Internalisierung externer Effekte eher als theoretisch-analytische Zwischenstufe zu charakterisieren, da zweifellos im Zusammenhang mit der Konzipierung von CO<sub>2</sub>-Minderungsstrategien auch bereits in einem frühen Stadium an den Einsatz pretialer Lenkungsinstrumente gedacht würde.

Zu II.: Alternativ wurde untersucht, welcher Maßnahmen energiepolitischer Natur es bedürfte, um bei einem Ausstieg aus der Kernenergie trotz Verzicht auf diesen CO<sub>2</sub>-freien Energieträger das CO<sub>2</sub>-Minderungsziel zu erreichen. Konkret wurden hierbei sämtliche in Variante I vorgesehenen Maßnahmen ange- setzt und zusätzlich eine weitere Anhebung der Energiepreise um 10 DM/GJ und 5 Pf/kWh (das heißt 15 DM/GJ und 7 Pf/kWh gegenüber dem Referenzfall) sowie eine Reihe weiterer verbrauchssenkender Maßnahmen – einschließlich der Einschränkung der freien Verkehrsträgerwahl – und Umstrukturierungen im Energieträgermix unterstellt.

Zu III.: Ausgehend von der Stufe „Hemmnisabbau“ (I.1) wurde hier untersucht, welche CO<sub>2</sub>-Minderungsmöglichkeiten in Kombination mit einem Ausbau der Kernenergie erschlossen werden könnten.

<sup>1)</sup> Es ist darauf hinzuweisen, daß diese „Preisaufläge“ als methodisches Hilfsmittel anzusehen sind und die tatsächlich erforderlichen Preiserhöhungen u. a. von der Mittelverausgabung (Abgabe / Subventionsdoppelhebel) abhängen aber auch von Mitnahmeeffekten und inflatorischen Wirkungen bestimmt werden.

## 2.2. Ergebnisvergleich

Die Ergebnisse der Variantenrechnungen sind in den folgenden Übersichten zusammengefaßt:

Tabelle 32

### Reduktion des Verbrauchs fossiler Energie und der CO<sub>2</sub>-Emissionen (absolute Werte, gemessen an den Daten von 1987)

Reduktionsszenario	Energieverbrauch Endenergie PJ	Energieverbrauch Umwandlung/Sonstige PJ	Summe PJ	CO <sub>2</sub> -Emission Endenergieverbrauch Mio. t	CO <sub>2</sub> -Emission Umwandlung/Sonstige Mio. t	Summe Mio. t
Hemmnisabbau (Stufe 1) . . . . .	738,4	483,0	1 221,4	63,5	54,5	118,1
Energiepolitik . . . . .	1 275,5	939,7	2 215,3	102,7	99,4	202,1
Kernenergieausstieg 1 . . . . .	1 780,5	-2,8	1 778,0	144,1	25,2	189,3
Kernenergieausstieg 2005 . . . . .	1 920,3	224,8	2 145,1	183,0	22,0	205,0
Kernenergieausbau . . . . .	747,4	1 553,1	2 415,5	65,5	158,1	223,7

Tabelle 33

### CO<sub>2</sub>-Reduktion und Verteilung auf die Bereiche Endenergieverbrauch und Umwandlungssektor/Sonstige (gemessen an den Daten von 1987)

Reduktionsszenario	Reduktion CO <sub>2</sub> -Emission Endenergieverbrauch (% abs.)	%-Anteil	Reduktion CO <sub>2</sub> -Emission Umwandlung/Sonstige (% abs.)	%-Anteil	Reduktion CO <sub>2</sub> -Emission gesamt (% abs.)
Hemmnisabbau (Stufe 1) . . . . .	13,9	53,8	21,2	48,2	16,5
Energiepolitik . . . . .	22,5	50,8	38,5	49,2	28,3
Kernenergieausstieg 1 . . . . .	31,5	85,1	9,5	14,9	23,7
Kernenergieausstieg 2005 . . . . .	40,1	89,3	8,5	10,7	28,7
Kernenergieausbau . . . . .	14,4	29,3	61,3	70,7	31,3

Es zeigt sich, daß mit Hilfe der verschiedenen Varianten CO<sub>2</sub>-Minderungen zwischen 118 Millionen Tonnen und 224 Millionen Tonnen bezogen auf das Ausgangsniveau von 715 Millionen Tonnen in 1987 erreicht werden können. Dies entspricht einem Rückgang zwischen rund 17 Prozent und 31 Prozent.

Die höchste CO<sub>2</sub>-Minderung ist bei „Kernenergieausbau“ zu verzeichnen (31,3 Prozent). Sie liegt nahezu doppelt so hoch wie bei der Stufe 1 „Hemmnisabbau“ (16,5 Prozent).

Eine annähernd gleich große CO<sub>2</sub>-Minderung wie bei „Kernenergieausbau“ wird in der Variante „Energiepolitik“ (28,3 Prozent) erwartet, während bei einem Kernenergieausstieg auf Basis der zunächst getroffenen Annahmen nur 23,7 Prozent CO<sub>2</sub>-Minderung erreichbar erschienen. Daher wurde auf Wunsch der Kommission das Reduktionsszenario „Kernenergieausstieg 2005“ untersucht, die zu einer ebenso hohen CO<sub>2</sub>-Reduktion führt, wie die Energiepolitik-Variante, um einen Vergleich der Szenarien hinsichtlich

der hierfür erforderlichen Voraussetzungen zu ermöglichen.<sup>1)</sup>

Die Reduzierung der CO<sub>2</sub>-Emissionen entfällt in den einzelnen Varianten in sehr unterschiedlichem Maße auf die beiden Bereiche Endenergieverbrauch und Umwandlungssektor: Während beim Kernenergieausbau 70 Prozent durch den Umwandlungssektor (und 30 Prozent durch den Endenergieverbrauch) erbracht werden, sind es beim Reduktionsszenario „Kernenergieausstieg 2005“ 11 Prozent, 89 Prozent im Endenergieverbrauch (EEV), wobei in diesem Falle sogar der größte Effekt durch die mittelbare Wirkung der Reduzierung des EEV erzielt wird.

In den beiden Stufen des „Reduktionsszenario Energiepolitik“ erbringen beide Bereiche anteilmäßig in etwa gleich hohe Beiträge zur CO<sub>2</sub>-Minderung.

<sup>1)</sup> In den Ausführungen „Ergebnisvergleich“ ist das Reduktionsszenario „Kernenergieausstieg 1995“ nicht berücksichtigt.

Tabelle 34

Energieträgerstrukturen der Szenarien im Vergleich<sup>1)</sup>

	Steinkohle	Braunkohle	Benzin	Heizöl EL	Heizöl S	SMÖP	Gase	Summe	Strom <sup>2)</sup>
<b>Basisjahr 1987</b>									
Verbrauch (PJ) ...	1 865,5	999,2	1 085,5	2 623,0	425,5	4 114,0	2 307,4	9 286,1	1 413,6
<b>Hemmnisabbau (Stufe 1)</b>									
Verbrauch (PJ) ...	1 490,1	788,6	805,5	2 029,6	182,3	3 017,4	2 768,6	8 064,7	1 552,2
Differenz abs. ....	-375,4	-210,6	-260,0	-593,4	-243,8	-1 096,6	461,2	-1 221,4	138,6
Differenz (%) .....	-20,1	-21,1	-24,4	-22,5	-57,3	-26,7	20,0	-13,2	9,8
<b>Energiepolitik</b>									
Verbrauch (PJ) ...	1 171,3	630,0	679,0	1 709,8	163,5	2 552,3	2 717,2	7 070,8	1 424,6
Differenz abs. ....	-694,2	-359,2	-386,5	-913,2	-262,0	-1 561,7	409,8	-2 215,3	11,0
Differenz (%) .....	-37,2	-36,9	-36,3	-34,8	-61,6	-38,0	17,8	-23,9	0,8
<b>Kernenergieausstieg 1</b>									
Verbrauch (PJ) ...	1 547,0	604,0	630,8	1 213,0	44,0	1 887,8	3 365,0	7 503,8	1 335,0
Differenz abs. ....	-218,5	-395,2	-434,7	-1 410,0	-381,5	-2 226,2	1 057,6	-1 782,3	-78,6
Differenz (%) .....	-11,7	-39,6	-40,8	-53,8	-89,7	-54,1	45,8	-19,2	-5,5
<b>Kernenergieausstieg 2005</b>									
Verbrauch (PJ) ...	1 404,0	548,0	631,0	1 179,0	47,0	1 857,0	3 331,0	7 140,0	1 275,5
Differenz abs. ....	-461,5	-451,2	-434,5	-1 444,0	-378,5	-2 257,0	1 023,6	-2 146,1	-138,1
Differenz (%) .....	-24,7	-45,2	-40,8	-55,1	-89,0	-54,9	44,4	-13,1	-9,8
<b>Kernenergieausbau</b>									
Verbrauch (PJ) ...	1 090,8	452,0	805,5	1 715,3	170,1	2 690,9	2 636,9	6 870,8	1 544,9
Differenz abs. ....	-774,7	-547,2	-260,0	-907,7	-255,4	-1 423,1	329,5	-2 415,5	131,3
Differenz (%) .....	-41,5	-54,8	-24,4	-34,6	-60,0	-34,6	14,3	-28,0	9,3

1) SMÖP = Summe Mineralölprodukte

2) ohne Berücksichtigung von 106 PJ Eigenerzeugung zur Eigenverwendung

Tabelle 34 weist die den einzelnen Szenarien zugrundegelegte Energieträgerstruktur aus. In den Szenarien Hemmnisabbau und Kernenergieausbau nimmt der Stromverbrauch noch leicht zu (+9 Prozent), während er in allen anderen Szenarien mit wachsender energiepolitischer Eingriffstiefe um bis zu 10 Prozent (Ausstieg 2) zurückgeht. In der Ausstiegsvariante wird ein zusätzlicher Gaseinsatz (bei stark reduziertem Gesamtverbrauchsniveau) in Höhe von rund 45 Prozent für erforderlich gehalten (in allen anderen Varianten jedoch nur in Höhe von 15 Prozent bis 20 Prozent) gleichzeitig soll sich der Ölverbrauch um über die Hälfte vermindern (bei Kernenergieausbau und Energiepolitik nur um ein gutes Drittel). Der Einsatz von Festbrennstoffen (heimische und Importbrennstoffe) mit ihren vergleichsweise hohen CO<sub>2</sub>-Emissionen reduziert sich im Szenario Kernenergieausbau stark um fast 50 Prozent, in den anderen Szenarien – bei allerdings zum Teil deutlich niedrigerer CO<sub>2</sub>-Reduktion – dagegen nur um 20 Prozent.

Einen Überblick über den veränderten Energieträgermix zur Stromerzeugung in den verschiedenen Szenarien vermitteln die folgenden Tabellen 35 und 36.

Mit der dargelegten strukturellen Entwicklung des Energieverbrauchs wären gravierende Umschich-

tungsprozesse in allen Energiesektoren, in den Umwandlungsbereichen wie im Endenergieverbrauch verbunden. Angesichts des relativ kurzen Betrachtungszeitraums bis zum Jahre 2005 scheint kaum vorstellbar, daß Anpassungsprozesse dieses Ausmaßes ohne erhebliche Friktionen abgewickelt werden könnten. Es war im Rahmen der vorgelegten Arbeit nicht möglich, die sich hieraus ergebenden wirtschaftlichen (Kapitalvernichtung durch vorzeitige Stilllegung), energie-, beschäftigungs- und regionalpolitischen Implikationen (vor allem den heimischen Steinkohlen- und Braunkohlenbergbau betreffend) auch nur im Ansatz zu würdigen (Dies gilt auch für die Verlagerung von Straßen- und Luftverkehr auf die Schiene. Die Durchsetzung der 2/3 Wärmesaniierung von Gebäuden im Zusammenhang mit normalen Renovierungsmaßnahmen u. a. m.). Bei aller Ungewißheit muß jedoch davon ausgegangen werden, daß hieraus für die Implementation CO<sub>2</sub>-mindernder Strategien erhebliche Durchsetzungsprobleme resultieren.

Im einzelnen ist folgendes festzustellen:

- Ein ausschließlich auf Hemmnisabbau ausgerichteter Maßnahmenkatalog erbringt gegenüber dem „Trend“ eine zusätzliche CO<sub>2</sub>-Minderung in Höhe von etwa 12 Prozent.



Tabelle 35

## Verteilung der Stromerzeugung auf einzelne Energieträger in Petajoule (PJ)

Energieträger	1987	Hemmnis- abbau (Stufe 1)	Energie- politik	Kernenergie Ausstieg 1	Kernenergie Ausstieg 2005	Kernenergie- ausbau
Steinkohlen .....	384,6	229,8	112,6	307,7	230,8	168,0
Braunkohlen .....	275,6	236,5	180,5	165,4	151,8	104,5
Heizöl EL .....	—	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
Heizöl S .....	11,1	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
Gase .....	77,3	110,7	131,1	355,1	373,1	99,5
Wasser .....	74,1	85,1	88,7	94,1	94,1	85,1
Kernkraft .....	469,9	576,0	576,0	0,0	0,0	894,6
Wind .....		4,9	17,2	31,0	38,6	4,9
Photovoltaik .....		0,1	1,8	3,6	7,2	0,1
Statistische Differenz .....	-0,9					
Zwischensumme .....	1 291,7	1 243,1	1 107,9	956,8	895,4	1 356,7
Industrielle Eigenerzeugung zur Eigenverwendung .....	106,0	106,0	106,0	106,0	105,0	106,0
Sonstige KWK .....	108,0	295,4	303,0	366,4	366,4	174,5
Summe .....	1 505,9	1 644,5	1 516,9	1 429,3	1 367,8	1 637,2

Tabelle 36

## Brennstoffeinsatz zur Stromerzeugung ohne Kraft-Wärme-Kopplung in Petajoule (PJ)

Brennstoffeinsatz nicht KWK (PJ) <sup>1)</sup>	1987	Hemmnis- abbau (Stufe 1)	Energie- politik	Kernenergie Ausstieg 1	Kernenergie Ausstieg 2005	Kernenergie- ausbau
Steinkohlen .....	973,3	581,5	258,1	769,2	569,8	425,1
Braunkohlen .....	784,2	540,9	481,3	471,1	415,3	297,4
Heizöl EL .....	—	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
Heizöl S .....	28,1	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
Gase .....	169,7	230,0	264,8	703,1	744,6	207,5
Wasser .....	184,0	214,2	219,9	229,2	215,5	212,8
Kernkraft .....	1 232,7	1 450,0	1 427,8	0,0	0,0	2 236,5
Wind .....	0,0	12,3	42,6	75,5	88,3	12,3
Photovoltaik .....	0,0	0,3	4,5	8,8	16,5	0,3
stat. Diff. ....	-2,6					
Zwischensumme .....	3 369,4	3 129,2	2 746,2	2 257,0	2 050,0	3 391,9

<sup>1)</sup> Kernenergie, Regenerative: Brennstoffäquivalent

– Mit einer zusätzlichen Preisanhebung für den Faktor Energie in Höhe von 5 DM/GJ bei den Brennstoffen sowie 2 Pf/kWh bei Strom (dies entspricht immerhin in etwa einer Verdoppelung der im Referenzfall angenommenen Preissteigerung) soll durch die Kombination von Energiepreisanhebung und einem breiten Spektrum sonstiger energiepolitischer Maßnahmen ein doppelt so großer Reduzierungsbeitrag geleistet werden können.

– Bei „Kernenergieausstieg 1“ läßt sich mit den unterstellten Eingriffen die – wie oben dargelegt – noch weit über die in der Variante Energiepolitik unterstellten Maßnahmen hinausgehen, eine zusätzliche Minderung von 20 Prozent gegenüber dem Trendverlauf erreichen. Unter Berücksichtigung des dem „Hemmnisabbau“ zugeschriebenen Effektes entfielen damit auf die zusätzliche Verteuerung des Faktors Energie um 15 DM/GJ sowie 7 Pf/

kWh einschließlich der übrigen energiepolitischen Eingriffe in diesem Fall eine CO<sub>2</sub>-Minderung von lediglich rund 7 Prozent. Es wird jedoch für möglich gehalten, mit einer Reihe weiterer energiepolitischer Maßnahmen (so unter anderem höheren Subventionen für regenerative Energiequellen) und veränderte Annahmen über die Struktur der Warmwasserbereitung und des Energieträgermixes eine Reduzierung der CO<sub>2</sub>-Emissionen um weitere 36 Millionen Tonnen, (entsprechend zusätzlich 5 Prozent) zu realisieren. Damit erreicht das Reduktionsszenario „Kernenergieausstieg 2005“ eine CO<sub>2</sub>-Reduktion um 28,7 Prozent. Gegenüber der Variante „Kernenergieausstieg 1“ erbringen allein die verstärkten Rückführungen bei Steinkohle (zusätzliche Reduktion 243 PJ beziehungsweise 8,3 Millionen Tonnen SKE) und Braunkohle (zusätzliche Reduktion 56 PJ beziehungsweise 6,7 Millionen Tonnen Braunkohle) bereits eine Entlastung bei den CO<sub>2</sub>-Emissionen in Höhe von 28,7 Millionen Tonnen (22,4 Millionen Tonnen plus 6,3 Millionen Tonnen), entsprechend weiteren 4 Prozent.

Allein die bewertbaren Maßnahmen erfordern hier allerdings bis zum Jahr 2005 bereits ein geschätztes Investitionsvolumen von 510 Milliarden DM (vgl. Nr. 1.3.3).

- Zieht man von der gesamten CO<sub>2</sub>-Minderung der Kernenergieausbauvariante die dem Hemmnisabbau zugeschriebenen Beiträge (12,5 Prozent) ab, so verbleibt ein der verstärkten Nutzung der Kernenergie zurechenbarer Effekt in Höhe von 14,8 Prozent gemessen an der Referenzentwicklung.
- Insgesamt zeigt sich, daß auf die drei Maßnahmenkomplexe: „Hemmnisabbau“, „Verdoppelung des Energiepreisanstiegs“ und Kernenergieausbau der Größenordnung nach etwa gleich hohe Minderungsbeiträge entfallen (12,5 / 11,8 / 14,8 Prozent). Keiner dieser Maßnahmenkomplexe ist damit für sich alleine in der Lage, das gesteckte CO<sub>2</sub>-Minderungsziel zu erreichen. Hierzu ist vielmehr eine Mischstrategie erforderlich, die die unterschiedlichsten Elemente aus wenigstens zwei Maßnahmebereichen miteinander verknüpft.

### 2.3. Diskussion kritischer Punkte

Generell ist festzustellen, daß trotz intensiven Bemühens die aufgeführten Ergebnisse nur als „beste“ in der Kürze der Zeit erzielbare Schätzungen angesehen werden dürfen. Alle Rechnungen basieren auf Annahmen, die zum Teil erhebliche Konsistenzprobleme aufwerfen. Auch eine befriedigende Behandlung der jeder Prognose innewohnenden Ungewißheitsprobleme konnte nicht geleistet werden. Eine abschließende Bewertung der einzelnen Maßnahmenkomplexe dürfte nicht nur an den nur in relativ grober Form vorliegenden Aussagen zur Effektivität (CO<sub>2</sub>-Minderung im einzelnen) scheitern, sondern auch an der Qualität der Angaben über Kosten und Zielverzichte (Effizienzkriterium), die mit der Realisierung der einzelnen Maßnahmen verbunden wären. Das-

selbe gilt hinsichtlich der im Einzelfalle zu verzeichnenden Konsequenzen für andere wirtschafts- und gesellschaftspolitische Ziele („trade offs“), die Probleme einer Durchsetzung und Kontrolle der für eine Erschließung der einzelnen CO<sub>2</sub>-Reduktionspotentiale erforderlichen Maßnahmen beziehungsweise der diesbezüglichen Entscheidungsfindung im politischen Raum. Diese Elemente scheinen gleichwohl für die Legitimierung so weitreichender Eingriffe, wie sie im Zusammenhang mit der CO<sub>2</sub>-Problematik nicht mehr ausgeschlossen werden können, unverzichtbar, können aber – realistisch gesehen – wohl nur im Rahmen einer konkreten Strategiediskussion und bei Vorgabe politischer Ziele und Prioritäten geleistet werden.

Im einzelnen darf nicht unberücksichtigt bleiben, daß die in den Szenarien aufgezeigten Reduktionspotentiale nur vor dem Hintergrund der jeweils im einzelnen getroffenen Annahmen gewürdigt werden können. Soweit möglich, wurde zwar begründeten Plausibilitätsüberlegungen gefolgt. Allerdings konnte den Rechnungen kein in sich geschlossenes widerspruchsfreies Modell zugrundegelegt werden. Im Rahmen des „Finetuning“ mußte zum Teil sogar in erheblichem Maße auch auf subjektiv gesetzte Wertungen (zum Beispiel was das denkbare Maß der in den einzelnen Szenarien im Zeitablauf realisierbaren CO<sub>2</sub>-Minderungen, die Durchsetzung des technischen Fortschritts, die Herbeiführung eines Konsenses, den Erfolg des Hemmnis-Abbaus oder der preispolitischen Maßnahmen und nicht zuletzt auch die als „zulässig“ angesehene Reduzierung des deutschen Steinkohle- und Braunkohlebergbaus anbelangt) zurückgegriffen werden.

Ohne daß auf Einzelheiten eingegangen werden soll, muß zum Beispiel als für das aufgezeigte Ergebnis (die in den einzelnen Szenarien als erreichbar anzusehende CO<sub>2</sub>-Minderung) außerordentlich bedeutsam angesehen werden, daß im Referenzfall – allerdings durch die Vorstudien vorgegeben – von einer konstanten Bevölkerung, einer Steigerung der Energiepreise (außer bei Festbrennstoffen und Strom) um Größenordnungsmäßig 50 Prozent und einer nicht nachvollziehbaren Spreizung zwischen dem Preisanstieg für die Leitenergie Rohöl, den Mineralölprodukten sowie den übrigen Energieträgern ausgegangen wurde. Traditionelle Relationen zwischen den einzelnen Energieträgerpreisen werden jedenfalls mit diesen Annahmen weitgehend außer acht gelassen.

Angesichts der jüngeren Entwicklung scheint eine um ca. 5 Millionen höhere Bevölkerung in der Bundesrepublik Deutschland (ohne ehemalige DDR) wahrscheinlicher als die im Referenzszenario unterstellte. Auch ist es durchaus nicht ausgeschlossen, daß – insbesondere bei Durchsetzung einer weltweiten CO<sub>2</sub>-Konvention – das Energiepreinsniveau für Öl und Kohlen auf dem Weltmarkt gerade nicht steigt (Rückwärtung), und daß sich die Preise für CO<sub>2</sub>-arme Energieträger wie Erdgas vor allem bei steigender Nachfrage überproportional erhöhen, weil die Kosten alternativer CO<sub>2</sub>-Reduzierungen internalisiert werden. Die komplexen hiermit aufgeworfenen Fragen, die auch beträchtliche internationale Verteilungsprobleme beinhalten, konnten im Rahmen dieser Untersuchung allerdings nicht analysiert werden.

Gleichzeitig flossen in die Abschätzung der CO<sub>2</sub>-Reduktionspotentiale in hohem Maße Erwartungen und Einschätzungen der Bearbeiter über Kostendegressionseffekte, den zukünftigen technischen Fortschritt sowie dessen Penetrationsgeschwindigkeit und die Durchsetzbarkeit politischer Maßnahmen ein. Diese Annahmen dürften zum Teil als optimistisch angesehen werden. Die CO<sub>2</sub>-Minderungsvarianten, die hier im einzelnen durchgespielt wurden, stellen damit lediglich eine begrenzte Auswahl denkbarer Szenarien dar, die sogar nur den Charakter von Zielprojektionen tragen (welche Maßnahmenkomplexe sind erforderlich, um ein vorgegebenes CO<sub>2</sub>-Reduktionsziel zu erreichen?).

Die Resultate der Reduktionsszenarien (Energiebilanzen und abgeleitete CO<sub>2</sub>-Reduzierungen) sind deshalb nicht ausschließlich als „Ergebnisse“ von Modellrechnungen anzusehen. Sie wurden zum Teil nach Plausibilitätsüberlegungen gesetzt, die häufig auch die (politische) Philosophie der jeweiligen „Strategie“ und nicht unbedingt das Ergebnis einer Abwägung zum Beispiel nach Effizienzkriterien widerspiegeln, oder auch nur eine Fortschreibung der für die Vergangenheit festgestellten Entwicklung darstellen. Für weite Bereiche der Analyse der Reduktionspotentiale stehen belastbare Kostenangaben und insbesondere Angaben zu Kosten in Gestalt von Zielverzichten nicht oder nur rudimentär zur Verfügung.

Selbst dort wo Kostenangaben gemacht werden, ist deren Ermittlung und Abgrenzung sorgfältig zu prüfen. So beziehen sich beispielsweise die Kostendaten für nachträgliche Maßnahmen der Wärmedämmung im Altbaubereich regelmäßig auf sogenannten Zusatzkosten. Hierbei wird davon ausgegangen, daß innerhalb bestimmter zeitlicher Intervalle normalerweise Renovierungsmaßnahmen an allen Bauten durchgeführt und hierbei in den meisten Fällen (70 Prozent) gleichzeitig auch die erforderlichen Energieeinsparmaßnahmen durchgeführt werden. Im Fall der Fassadenverkleidung werden daher zum Beispiel die Kosten der Einrüstung des Hauses nicht angesetzt. Allein dieses Beispiel mag verdeutlichen, mit welcher Streubreite die Ergebnisse hierauf basierender Schätzungen über CO<sub>2</sub>-Minderungen behaftet sind.

Ein nicht zu unterschätzendes Problem liegt auch in der mangelnden Trennung von Grenzkosten und Durchschnittskosten bei der Ableitung von Potentialgrößen. So wird zum Beispiel für den Altbauwärmeschutz ein Investitionsvolumen von 116 Milliarden DM bei durchschnittlichen Kosten von 6 Pf je eingesparter Kilowattstunde Endenergie genannt. Dieser Durchschnittswert resultiert jedoch aus – auf Haustypen bezogenen – Einzelwerten, die bis zu 13 Pf/kWh betragen. Hinzu kommt, daß auch die „Wärmeschutzpakete“ für spezifizierte Haustypen wiederum in Einzelmaßnahmen zerlegt werden können, mit dem Ergebnis einer auch hier zu unterstellenden Bandbreite der Kosten für die Einsparung von Heizenergie.

Da ein streng rational handelnder Investor im Rahmen seiner Kapitalbudgetierung keine Durchschnitts- sondern stets eine Grenzbetrachtung anstellt und die Projekte in der Rangfolge ihrer relativen Vorteilhaftigkeit realisiert, können alle jene Maßnahmen nicht zum Zuge kommen, deren individuelle Grenzkosten über

dem für Energieeinsparung anlegbaren Preis liegen. Im genannten Beispiel würde sich insofern das Potential beträchtlich verringern können. Unabhängig hiervon wird das gegebene Einsparpotential immer dann nicht ausgeschöpft, wenn – siehe Hemmnisabbau-Kapitel – die individuellen Vorstellungen über Kapitalrückflußzeiten von Lebensdauerüberlegungen abweichen oder individuelle Präferenzraten sich von gesellschaftlichen unterscheiden.

Bereits die Formulierung einer CO<sub>2</sub>-Minderungsvariante „Hemmnisabbau“ verdeutlicht, daß auch generell für wirtschaftlich erachtete Potentiale nicht unbedingt von den einzelnen Wirtschaftssubjekten auch tatsächlich ausgeschöpft werden. Dies kann zum einen an Marktvollkommenheiten wie etwa mangelnder Information oder zu hohen Transaktionskosten liegen, aber ebenso gut in differierenden Bewertungsmaßstäben oder Präferenzen begründet sein (zum Beispiel individuelle Risiko-Nutzen Funktionen, Zeitpräferenzen etc.). Offensichtlich weicht das empirisch feststellbare Verhalten zahlreicher Marktteilnehmer vielfach vom normierten Ideal gesellschaftlich rationaler Handlungsweise ab.

Im übrigen zeigt ein näherer Blick darauf, was alles unter der vergleichsweise unproblematisch erscheinenden Bezeichnung „Hemmnisabbau“ subsumiert wird, daß hierunter ein Spektrum energiepolitischer Eingriffe verstanden wird, das von Maßnahmen zur Informationsverbesserung über Selbstverpflichtungen bis hin zu Vorkehrungen zur Veränderung von Preisbildungsprozessen und Einschränkung der Konsumentensouveränität reicht, was Fragen nach der Durchsetzbarkeit entsprechender Maßnahmen aufwirft.

Insofern ist unter Berücksichtigung der hiermit verbundenen „trade offs“ die Vorstellung, daß in jedem Falle mit der Konzipierung entsprechender Maßnahmen und Maßnahmenbündel ein entsprechender Erfolg vorprogrammiert sei, durchaus nicht sicher.

Die Kummulierung jeweils als relativ optimistisch anzusehender Elemente läßt aber nur den Schluß zu, daß das in der „Hemmnisabbau“-Variante aufgezeigte CO<sub>2</sub>-Minderungspotential lediglich als ein oberer Grenzwert anzusehen ist.

Dies gilt in noch stärkerem Maße für die übrigen Varianten:

In der Variante „Energiepolitik“ wird einerseits unterstellt, daß keine Beeinträchtigung des Wirtschaftswachstums und der Industriestruktur durch die energiepolitischen Eingriffe eintritt, andererseits wird die Frage einer politischen Durchsetzbarkeit der in diesem Szenario unterstellten energiepolitischen Eingriffe im nationalen und internationalen Kontext nicht hinreichend gewürdigt.

Hierbei ist insbesondere auf den Aspekt der Wettbewerbsfähigkeit im internationalen Vergleich hinzuweisen, welche von strukturellen Verzerrungen und Verschiebungen im industriellen Bereich nicht unbeeinflusst bleiben kann. Verlagerungen einzelner Produktionszweige ins Ausland und Importe energieintensiver Produkte als Reaktion auf restriktive CO<sub>2</sub>-Politiken hätten wohl ohne jeden Zweifel nur den

Charakter von Scheinlösungen. Ihre Verhinderung kann nur durch abgestimmte, beispielsweise EG-weite Rahmenbedingungen für CO<sub>2</sub>-Emittenten gelingen. Dem müssen nationale CO<sub>2</sub>-Maßnahmen Rechnung tragen. Ihre EG-Kompatibilität ist um so mehr in Frage gestellt, je stärker der Staat versuchen würde, in das wirtschaftliche Geschehen einzugreifen. Dies schließt andererseits in bestimmten Bereichen auch lediglich national angelegte Strategien nicht aus.

Unbeantwortet bleibt die Frage ob Steuern oder Abgaben notwendigerweise zu den erwarteten Preissteigerungen führen. Auch wenn Angaben zu Preiselastizitäten der Energienachfrage in den meisten Bereichen z. Z. eher qualitativen denn quantitativen Charakter besitzen dürften läßt sich bereits heute feststellen, daß Anpassungsreaktionen auf die vorgesehenen Markteingriffe in entscheidendem Maße von Weiter- und auch Rückwärtigungsprozessen gekennzeichnet sein können. Die Grenzwirkung von Preisänderungen auf das Nachfrageverhalten wird nicht nur von Energieträger zu Energieträger unterschiedlich ausfallen. Die Vielzahl von Verwendungsbereichen und -möglichkeiten ein und desselben Energieträgers schafft eine breite Palette denkbarer Reaktionsmuster, die in Abhängigkeit von divergierenden Präferenzstrukturen verschiedener Abnehmergruppen eine zusätzliche Erweiterung erfahren dürfte.

Die Annahme eines einheitlichen Preisaufschlages unabhängig von der „CO<sub>2</sub>-Lastigkeit“ des jeweiligen Energieträgers oder der jeweiligen Verwendung ist dabei – weil nicht am Verursacherprinzip orientiert – kaum zu begründen, sie relativiert auch kostenbedingte Preisdifferenzen zwischen Energieformen unterschiedlicher Wertigkeit und konterkariert damit die im Szenario „Energiepolitik“ unter anderem vorgeschlagene stärker an der thermodynamischen Wertigkeit orientierte Bewertung/Preisstellung (vgl. Kap. 4, Nr. 2.5).

Bereits heute spiegeln die Preise auf den Energiemärkten unterschiedliche Wertigkeiten einzelner Energieträger wieder. So kostet das kJ chemisch gebundener Brennstoffwärme je nachdem ob in Form von Heizöl (schwer, leicht), Braunkohle, Steinkohle oder Gas unterschiedlich viel, und die „energierichteste“ Endenergie Strom ist mit Abstand am teuersten. Die Marktpreisdifferenzen ergeben sich dabei jedoch nicht allein aus dem direkten Vergleich der Energieträger nach ihren technischen Qualitäten. Vielmehr führt eine Vielzahl von Einzelentscheidungen in Abwägungsprozessen, die von objektiven Verwendungsvorteilen ebenso wie von subjektiven Wertschätzungen geprägt werden, zu Veränderungen im interdependenten Gefüge der relativen Preise. So wirken Produkt- und Verfahrensinnovationen ebenso unterschiedlich auf die einzelnen Energiepreise, wie Änderungen von Kapital- und Personalkosten, abhängig davon, welche Faktoren zum Einsatz des jeweiligen Energieträgers in wie hohem Maße erforderlich sind. Schließlich ist die Nachfrage nach Energie immer abgeleiteter Natur und deshalb auch nur im Zusammenhang mit der Verwendung der ihren Einsatz erfordernden Kapitalgüter vor dem Hintergrund der damit verbundenen Nutzenstiftung zu sehen. All diesen Über-

legungen wäre bei staatlichen Eingriffen in die Preisbildung Rechnung zu tragen.

Zudem zeigt sich eine Diskriminierung beim Ansatz der Preisaufschläge für Brennstoffe von DM 5/GJ (15/GJ in der Variante Kernenergieausstieg) und für Strom von 2 Pf/kWh (beziehungsweise 7 Pf/kWh). So würde zum Beispiel die Verteuerung von Kraftwerkskohle um DM 5/GJ (entspricht 146 DM/pro Tonne SKE) die Stromerzeugungskosten der fossilen Kraftwerke allein, sogar bei einem unterstellten Wirkungsgrad von 40 Prozent, bereits um 4,5 Pf/kWh erhöhen (Fall Energiepolitik).

Diese Überlegungen gelten in noch weit höherem Maße für die Variante „Kernenergieausstieg“ mit ihren noch weit stärkeren energiepolitischen Aktivitäten. Immerhin bedeutet die der Ausstiegsvariante zugrundeliegende Philosophie „Energiespar“ neben den um weitere Maßnahmen ergänzten Katalog energiepolitischer Eingriffe entsprechend der „Hemmnisabbau“-Variante je nach Energieträger eine beträchtliche Erhöhung der Energiepreise (bis auf das Vierfache [Heizöl S], Dreifache [Heizöl EL], oder mehr als das Doppelte [Gas] des Ausgangsniveaus von 1987). Die aus der divergierenden Belastung der einzelnen Energieträger mit Abgaben resultierenden Ungleichgewichte wirken hier sogar noch stärker. Für die Variante „Energiespar“ mit 15 DM/GJ würde einer Preiserhöhung von angenommenen 7 Pf/kWh beim Strom eine induzierte Kostenerhöhung in Höhe von 13,5 Pf/kWh gegenüberstehen.

Völlig unberücksichtigt bleiben auch die gewaltigen aus der Energiebesteuerung resultierenden Umverteilungseffekte mit ihren ungeklärten Wirkungen je nach Ausgestaltung und betroffenen Gruppen: Immerhin handelt es sich in der Variante „Kernenergieausstieg“ um ein Volumen von bis zu 110 Milliarden DM/Jahr (in der „Energiepolitik“-Variante von 35 Milliarden DM/Jahr). Eingriffe dieses Umfangs werfen – völlig abgesehen von der in diesem Falle in Kauf zu nehmenden Kapitalvernichtung nicht näher untersuchter Größenordnung auch im Kohle- und Ölbereich – eine ganze Reihe von Fragen auf, von denen hier nur einige stichwortartig angeführt seien:

Gefahr von Fehlallokationen mit Folgen für Wirtschaftswachstum, Investitionsbereitschaft, Planungssicherheit und Produktionsverlagerungen; Mitnahmeeffekte; Arbitragemöglichkeiten und erneute Eingriffsnotwendigkeiten zu deren Ausschaltung; Entzug großer Teile des verfügbaren Einkommens und damit einhergehender Nachfrageausfall; unerwünschte Umverteilungseffekte sind aber auch bei aufkommensneutraler Ausgestaltung möglicherweise mit unbekannter Konsequenz für die Energienachfrageentwicklung nicht auszuschließen. Hiergegen sind allerdings denkbare stimulierende Effekte der Mittelverausgabung für rationelle Energieverwendung, Technologien zur Nutzung regenerativer Energieträger sowie die Beschäftigung zu saldieren.

Schließlich ist nicht auszuschließen, daß im Falle eines Kernenergieausstiegs, der nicht auf die Bundesrepublik Deutschland beschränkt bliebe, die Annahme einer starken Rückgriffsmöglichkeit auf kostengünstige Erdgasangebote auf dem Weltmarkt in hohem Maße

in Frage zu stellen wäre. Angesichts dieser Überlegungen ist in hohem Maße fraglich, wie ein Kernenergieausstieg „einzelwirtschaftlich verträglich“ abgewickelt werden soll.

Ebenfalls als optimistisch mögen jedoch in der Variante „Kernenergieausbau“ die hierbei zugrundegelegten Kostenschätzungen, die gleichzeitig unterstellte Lösung der Akzeptanzprobleme sowie das erwartete Vordringen der Kernenergie auch in Bereiche außerhalb der öffentlichen Elektrizitätswirtschaft (Heizreaktoren und Industrie-HTR) und die hiermit aufgeworfenen Standortfragen) angesehen werden. Andererseits werden jedoch in diesem Falle außer Maßnahmen zum Hemmnisabbau keine weiteren energiepolitischen Eingriffe für notwendig erachtet. Indirekte Effekte, wie zum Beispiel die verstärkte Penetration von Strom als Basis für eine noch weitergehende CO<sub>2</sub>-Minderung wurden nicht berücksichtigt. Sofern es gelingt, die Akzeptanz- und die Entsorgungsprobleme zu lösen, können die Werte für die Variante „Kernenergieausbau“ eher als konservative Schätzung im Sinne der Ausschöpfung technischer Potentiale angesehen werden, da allein für den Ansatz einer Reihe weiterer Maßnahmen (verkehrliche Maßnahmen Szenario „Energiepolitik“, Gasmehreinsatz HuK-Sektor, stärkere Substitution von Festbrennstoffen in Industrie, HuK und Fernwärmewirtschaft) eine Reduktion der CO<sub>2</sub>-Emissionen um weitere 6 Prozent erwartet werden könnte.

Selbstverständlich sind generell weitere Reduzierungen der CO<sub>2</sub>-Emissionen möglich, wenn es gelingt, private und/oder gewerbliche Verbraucher dazu zu bewegen, auf einen Teil der Inanspruchnahme von Energiedienstleistungen zu verzichten. In diesem Zusammenhang entwickelte erste Überlegungen können nur subjektive Schätzungen vermitteln, da sie auf Annahmen zur „Zumutbarkeit“ oder „Inkaufnahme“ von Wohlfahrtsverlusten basieren. Durch Absenkung der Raumtemperatur um bis zu 2 Grad, die Reduktion beheizter Wohnfläche, verminderte Ansprüche an Körperhygiene und Wäschepflege (das heißt Reduktion Warmwasserbedarf um 10 bis 20 Prozent), Einschränkung privaten Straßen- und Flugverkehrs um 10 bis 15 Prozent und weiteren partiellen Verzicht auf nächtliche Straßenbeleuchtung könnten im Idealfall 4 bis 7 Prozent der verbleibenden CO<sub>2</sub>-Emissionen eingespart werden. Diese Aspekte berühren eindeutig die Privatsphäre sowie die Konsumentensouveränität und werfen damit Fragen nach ihrer Kompatibilität mit unserem Wirtschaftssystem auf. Ob bei Einsatz von Maßnahmen des „moral suasion“ entsprechende freiwillige Verzichte geleistet werden, ist nicht auszuschließen, aber auch nicht als sicher zu unterstellen! In jedem Fall muß vor der Gefahr mißbräuchlicher, willkürlicher Eingriffe zur Erschließung dieses Potentials gewarnt werden.

## 2.4 Fazit

Aus den vorstehenden Überlegungen folgt, daß die einzelnen Varianten im strengen Sinne nicht miteinander vergleichbar sind. Insbesondere fehlt ein einheitlicher etwa an Effizienzkriterien oder an den Möglichkeiten der politischen Durchsetzbarkeit orientier-

ter Bewertungsmaßstab. Dennoch darf bei allen Varianten festgestellt werden:

Die einzelnen Varianten zeigen zwar ein unterschiedlich hohes CO<sub>2</sub>-Minderungspotential, keine der technischen Optionen (Hemmnisabbau, Verdoppelung des Energiepreisanstiegs, Ausbau der Kernenergie) alleine scheint jedoch in der Lage, das gesteckte Minderungsziel auch nur in etwa zu erreichen. Die höchste energiepolitische Eingriffstiefe verlangt nach Maßgabe der hier vorgelegten Szenarien der Kernenergieausstieg, die Nutzung der Option Kernenergie mit dem höchsten Zielbeitrag setzt gleichzeitig allerdings als Vorbedingung die Lösung der Akzeptanzfrage, die Erschließung der Standorte und die Realisierung der Entsorgung voraus. Um das der „Energiepolitik“-Variante zugeschriebene geringere Minderungsziel von lediglich 28 Prozent zu erzielen, könnte in diesem Falle sogar auf einen Teil der Maßnahmen zum Hemmnisabbau verzichtet werden. Einen ähnlich hohen Beitrag zur CO<sub>2</sub>-Minderung wie der Kernenergieausbau versprechen zwar die Varianten „Energiepolitik“ und „Kernenergie-Ausstieg 2005,“ hierzu bedarf es jedoch erheblicher energiepolitischer Eingriffe, deren Durchsetzbarkeit im politischen Raum alles andere als sicher gelten kann. Die größten Erfolge verspricht eine Mischstrategie, in die einzelne – letztlich vom politischen Raum zu bestimmende – Elemente der Optionen eingehen und bei der die rationelle Energieverwendung eine herausragende Rolle spielen dürfte.

Für eine solche Mischstrategie spricht nicht zuletzt jedoch auch die Tatsache, daß die mit den einzelnen Optionen verbundenen Möglichkeiten der CO<sub>2</sub>-Reduktion beziehungsweise der Kosten ihrer Erschließung auch wesentlich ungünstiger beurteilt werden können, als im Rahmen dieser Untersuchung dargestellt wurde. Dasselbe gilt für die Möglichkeiten einer Nutzung der Potentiale regenerativer Energiequellen und des in diesem Zusammenhang unterstellten technischen Fortschritts, sowie der Erschließbarkeit von Kostensenkungspotentialen durch Nutzung der Größen- und Auslastungsdegression. Hierbei darf auch nicht unberücksichtigt bleiben, daß steigende Energiepreise auch inflationierend wirken und sich damit zu einem bestimmten Prozentsatz auch die Kosten der Einsparmaßnahmen ebenso wie die der Nutzung regenerativer Energiequellen erhöhen können. Dies gilt generell zwar auch für die kapitalintensive Nutzung der Kernenergie, trifft jedoch für die beiden Szenarien mit „künstlichen“ Energiepreiserhöhungen „Energiepolitik“ und „Kernenergieausstieg“ insoweit nicht zu, als hier definitionsgemäß kein Zubau neuer KKW-Kapazitäten zur CO<sub>2</sub>-Minderung vorgesehen ist.

Ebenso ist aus heutiger Sicht eher wahrscheinlich, daß die Bevölkerung nicht – wie im Referenzszenario unterstellt – konstant bleibt, sondern auf 65 Millionen ansteigt. Gleichzeitig ist nicht auszuschließen, daß das Energiepreinsniveau auf den Weltmärkten sich nicht oder nur unwesentlich erhöht, ein stärkeres Wirtschaftswachstum eintritt und die Kostendaten für Einsparung und regenerative Energieträger wesentlich ungünstiger ausfallen. In einem so definierten „Worst Case“ für die CO<sub>2</sub>-Reduzierung müßte – ohne daß hierfür Wahrscheinlichkeiten aufgestellt oder etwa

eine Bewertung vorgenommen werden sollte – gegebenenfalls befürchtet werden, daß im Trendverlauf nicht mit einem Rückgang, sondern vielmehr mit einem Anstieg der CO<sub>2</sub>-Emissionen, und zwar durchaus in einer Größenordnung von schätzungsweise 10 Prozent und mehr, zu rechnen wäre. Um diesen Betrag würden sich gleichzeitig die den beschriebenen Reduktionspfaden zugeschriebenen Reduktionspotentiale vermindern.

Ein Vorabverzicht auf eine der gegebenen Optionen, die in der Lage sind, einen spürbaren Beitrag zur CO<sub>2</sub>-Reduktion zu leisten, scheint vor diesem Hintergrund im Sinne einer Risikominimierungsstrategie kaum vertretbar. In jedem Falle ist unter Vertiefung der hier vorgetragenen Überlegungen möglichst umgehend eine effiziente und auch durchsetzbare Strategie zu entwickeln, die allgemein wirkende Instrumente mit sektorspezifischen Maßnahmen und Maßnahmenbündeln verbinden muß. Angesichts des fortschreitenden Einigungsprozesses ist hierbei in jedem Falle die ehemalige DDR mit in die Überlegungen einzubeziehen.

### 3. Ausblick auf 2050<sup>1)</sup>

#### 3.1 Referenz-Varianten des Laissez-faire

Projektionen der Entwicklung eines Wirtschafts- oder Energiesystems über 60 Jahre sind mit extrem großen Unsicherheiten behaftet. Methodisch muß hier versucht werden, die Zahl der möglichen Entwicklungsphasen durch den Entwurf von Szenarien einzugrenzen. Dabei besteht die Zielsetzung, einen Korridor zu umreißen, für den aus heutiger Sicht die Wahrscheinlichkeit groß ist, daß er den tatsächlichen Entwicklungspfad der Energiewirtschaft im Szenariozeitraum abdeckt. Hierzu werden zwei Szenarien: ein oberes „optimistisches“ Szenario und ein unteres, eher „pessimistisches“ Szenario entwickelt. Im oberen Szenario werden ab 2005 „günstige“ und im unteren Szenario „ungünstige“ Annahmen bezüglich der relevanten Rahmenbedingungen gebündelt. Die Begriffe „günstig“ beziehungsweise „ungünstig“ beziehen sich dabei auf die ökonomischen Entwicklungspotentiale. Für die energiewirtschaftliche beziehungsweise umweltspezifische Fragestellung der Szenarien kommt es darauf an, Rahmenbedingungen zu kumulieren, die eher zu einem hohen beziehungsweise eher zu einem niedrigen Energiebedarf führen. Hier kehrt sich der Sinngehalt der benutzten Begriffe günstig/ungünstig um.

Bezüglich der Bevölkerungsentwicklung in der Bundesrepublik Deutschland (ohne ehemalige DDR) werden in den beiden Szenarien zwei grundsätzlich verschiedene Entwicklungspfade verfolgt:

Im unteren Szenario dominieren die bekannten demographischen Parameter, insbesondere die sehr niedrigen Fruchtbarkeitsziffern, über den genannten Zeit-

raum von 60 Jahren. Im oberen Szenario wird dagegen vor dem Hintergrund einer „sich allmählich entleerenden“ Bundesrepublik Deutschland (ohne ehemalige DDR) ein zunehmender Einwanderungsdruck (und Einwanderungssog) erwartet.

Unter diesen Annahmen geht die Bevölkerung in den nächsten 60 Jahren im oberen Szenario insgesamt nur um 11 Millionen auf 50 Millionen Menschen, im unteren Szenario dagegen auf 39 Millionen zurück.

Die wirtschaftliche Entwicklung wird in den beiden Szenarien stark von der demographischen Entwicklung mitbestimmt: Die Zahl der Güter und Dienstleistungen nachfragenden Personen unterscheidet sich in den Szenarien bis 2050 um fast 11 Millionen. Entsprechend unterschiedlich fällt auch der „demand pull“ in der Endnachfrage aus.

Zusätzlich werden in den beiden Szenarien optimistische beziehungsweise pessimistische Annahmen zur

- weltwirtschaftlichen Entwicklung und der Struktur der internationalen Arbeitsteilung sowie
- zur Dynamik des technologischen Strukturwandels

getroffen.

Im Ergebnis wächst das Bruttoinlandsprodukt im oberen Szenario zwischen 2005 und 2050 um durchschnittlich 1,6 Prozent, im unteren Szenario bis 2030 nur um 1 Prozent. Nach 2040 schrumpft hier das Bruttoinlandsprodukt (BIP).

Der Endenergieverbrauch wird unter der Status-quo-Annahme, daß sich in allen Verbrauchsfaktoren ein kontinuierlicher, aber moderater Einsparprozeß vollzieht, im oberen Szenario bis 2050 nur um 12 Prozent zurückgehen. Im unteren Szenario könnte der Rückgang immerhin 40 Prozent betragen. Allerdings wären diese „Einsparserfolge“ im wesentlichen demographisch bedingt( 1987: 7 524 PJ; 2005: 7 408 PJ; 2050: 4 536 beziehungsweise 6643 PJ).

Unterstellt man für den Verstromungssektor ab 2005

- einen konstanten Beitrag der Kernenergie
- eine Ausschöpfung des Potentials an Müll-, Klärgas- und Deponiegasnutzung
- einen nur geringfügigen Ausbau der Windnutzung und Photovoltaik,

so kann im oberen Szenario der (bis 2050 auf 600 TWh) gestiegene Strombedarf nur durch einen erhöhten Einsatz von Kohle und/oder Erdgas gedeckt werden. Im unteren Szenario ist, bei einem praktisch konstanten Strombedarf um 400 TWh ein deutlicher Rückgang des Kohleinsatzes möglich.

Unter diesen Prämissen zeigt die Entwicklung der CO<sub>2</sub>-Emissionen im Zeitraum zwischen 2005 und 2050 in den beiden Szenarien deutliche Unterschiede. In der oberen Variante bleibt das Emissionsniveau mit über 600 Millionen Tonnen/a weiterhin sehr hoch (Rückgang gegenüber heute 13 Prozent), in der unteren Variante würde jedoch ein Rückgang auf 400 Millionen Tonnen/a erreicht (minus 45 Prozent).

<sup>1)</sup> Dieser Teil wurde im Rahmen der zusammenfassenden Energiestudie (vgl. Kapitel 6) von Dr. Masuhr federführend bearbeitet.

### 3.2 Langfristig erschließbare Kohlendioxid-Reduktionspotentiale

Die beschriebenen Szenarien zeigen eine Entwicklung, wie sie sich einstellen könnte, wenn keine entscheidenden Maßnahmen zur CO<sub>2</sub>-Reduktion ergriffen werden.

Im Sinne von „eingriffslosen“ Szenarien werden insbesondere

- die Potentiale der rationellen Energienutzung
- die Einsatzpotentiale der regenerativen Energien bei weitem nicht ausgeschöpft.

#### Rationelle Energienutzung

Die Referenzszenarien unterstellen auch in ihrer unteren Variante eine technologische Entwicklung, die die bestehenden technischen Möglichkeiten der rationellen Energienutzung, wie sie in Kap. 4 Nr. 2 skizziert wurden, nicht ausschöpft. Im einzelnen lassen sich folgende Aussagen machen:

- Im Raumwärmebereich unterstellt die Referenzentwicklung eine Abnahme des spezifischen Energiebedarfs von 740 MJ/m<sup>2</sup>, in 1987 auf 340 bis 390 MJ/m<sup>2</sup>, das heißt um 48 bis 55 Prozent bis zum Jahre 2050. Hierin enthalten sind ein Wohnflächenanteil von 7 bis 9 Prozent, der mit Wärmepumpen beheizt wird. Mit den Überlegungen zum spezifischen Nutzwärmebedarf weist das IWU bis 2050 ein wirtschaftliches Potential (bei 13 Pf/kWh) von 300 MJ/m<sup>2</sup> Endenergiebedarf aus. Hinzu kommen die Neubauten bis 2050, die mit einem Heizenergiebedarf von rund 100 MJ/m<sup>2</sup> das durchschnittliche Niveau von 2050 unter 300 MJ/m<sup>2</sup> senken könnten. Weitere CO<sub>2</sub>-Verminderungen ermöglicht die Substitution der konventionellen Brennstoffe durch regenerativ erzeugte Heizenergie. Auch ohne diese Maßnahme könnte der Heizenergiebedarf – je nach Wohnfläche – im Jahre 2050 zwischen 600 PJ und 780 PJ liegen.
- Im Kleinverbrauchsbereich unterstellt die Referenzvariante eine Verminderung des spezifischen Energieverbrauchs (gemessen an der Bruttowertschöpfung) einschließlich des inter- und intrasektoralen Strukturwandels und des Trends zu höherwertigen Dienstleistungen. Die Untersuchungen zur rationellen Energienutzung kamen zu dem Ergebnis, daß der Endenergiebedarf bei entsprechender Energiepolitik, insbesondere durch Wärmedämmung in den Nichtwohngebäuden, bei 850 bis 920 PJ im Jahre 2050 liegen könnte.
- Im Verarbeitenden Gewerbe geht die Referenzentwicklung in beiden Varianten von einer Abnahme des spezifischen Endenergiebedarfs von 0,6 Prozent/a zwischen 2005 und 2050 aus. Da diese Abnahme auch alle inter- und intraindustriellen Strukturveränderungen und den Trend zu höherwertigen Produkten enthält, die mit wenigstens einer jährlichen 0,5 Prozentigen Verminderung des spezifischen Endenergieverbrauchs zu veranschlagen ist, läßt sich aufgrund der in Kapitel 4 Nr. 2.6 genannten Energieeinsparpotentiale auch eine Abnahme um 2 bis 2,5 Prozent/a (einschließlich der strukturellen Veränderungen) be-

gründen. Diese gezielte Entwicklung zu energie-sparenden Produktionsprozessen würde einen Endenergiebedarf der Industrie zwischen 1200 PJ und 1400 PJ in 2050 ermöglichen.

- Im Verkehrsbereich liegen die Schätzungen der Referenzvariante zwischen 960 und 1350 PJ für das Jahr 2050. Die Ergebnisse der A.6-Untersuchung weisen rund 1100 PJ im Reduktionsfall und 2500 im Trend-Szenario aus. An diesen Unterschieden zeigen sich sehr deutlich die Unsicherheiten der Prognose des zukünftigen Energiebedarfs im Verkehrsbereich.

Faßt man die Hypothesen zum Energiebedarf zusammen, so zeigt sich, daß trotz eines Wirtschaftswachstums zwischen 2005 und 2050 in Höhe von 1 bis 2 Prozent pro Jahr, das heißt um insgesamt 50 Prozent bis 140 Prozent, der Endenergiebedarf in der Reduktionsvariante von rund 6700 PJ im Jahre 2005 weiter auf 4000 bis 4600 PJ im Jahre 2050 reduzierbar wäre, wenn man bestehende und sich abzeichnende Potentiale rationeller Energienutzung ausschöpfen und eine Siedlungs- und Verkehrspolitik unterstützen würde, wie sie in den Untersuchungen zum Verkehrsbereich unterstellt wurde. Gegenüber 1987 wäre der Endenergiebedarf um mindestens 40 Prozent reduzierbar. Zusammen mit dem Einsatz der erneuerbaren Energiequellen könnte man – unter den ausgewiesenen Annahmen – zu einer Verminderung der CO<sub>2</sub>-Emissionen von etwa 300 Tonnen für die Bundesrepublik Deutschland (ohne ehemalige DDR) kommen. Eine weitere Reduktion der CO<sub>2</sub>-Emissionen wäre in diesem Zeitraum nur durch Substitutionsmaßnahmen bei den Energieträgern und Effizienzverbesserungen sowie Emissionsminderungsmaßnahmen im Umwandlungssektor möglich.

#### Erneuerbare Energiequellen

Erneuerbare Energiequellen durften im ersten Zeitabschnitt bis zum Jahre 2005 nur einen begrenzten Beitrag zur Verminderung des Verbrauchs erschöpfbarer Energieressourcen und damit zur Reduktion klimarelevanter Spurengase leisten. Eine auf diese Periode beschränkte Betrachtung würde allerdings die langfristige Bedeutung der erneuerbaren Energiequellen, die heute noch immer erst am frühen Beginn ihrer Markteinführung stehen, systematisch unterschätzen. Wie sich aus den Studien ergeben hat, kann ihr technisches Potential – gemessen an der Reduktion der CO<sub>2</sub>-Emissionen – auf eine Größenordnung von 150 bis 170 Millionen Tonnen veranschlagt werden. Kurz- und mittelfristig werden davon nur kleine Teile wirtschaftlich erschließbar sein. Bei langfristig steigenden Energiepreisen dürften die erneuerbaren Energiequellen aber zunehmend konkurrenzfähig werden, zumal in Zukunft bei wachsender Marktpenetration mit erheblichen Kostenminderungen gerechnet werden kann.

Allerdings ist nicht zu verkennen, daß sich solche Perspektiven nicht automatisch eröffnen. Wie weit sie sich realisieren, hängt entscheidend von den energiepolitisch beeinflussbaren Rahmenbedingungen ab. Kommt es in den nächsten Jahren zu keiner wirksa-

men CO<sub>2</sub>-Reduktionsstrategie, die abgesehen von preispolitischen Maßnahmen auch eine verstärkte Förderung von erneuerbaren Energiequellen einschließt, so verschieben sich deren Einsatzmöglichkeiten in energiewirtschaft relevantem Maßstab bis weit in das folgende Jahrhundert hinein. Selbst wenn gezielte energiepolitische Maßnahmen kurz- und mittelfristig keine grundlegenden quantitativen Erfolge erwarten lassen, so würde der Verzicht darauf auch die langfristigen Chancen zunichte machen.

#### Substitution von fossilen Energieträgern untereinander

Die CO<sub>2</sub>-Minderungsmöglichkeiten durch CO<sub>2</sub>-ärmere fossile Energieträger sind über einen Zeitraum von rund 60 Jahren wohl nur durch die Verfügbarkeit dieser Energieträger (Erdgas und Mineralöl) begrenzt und nicht durch anlagentechnische oder zubauseitige Restriktionen. Angesichts der ressourcenseitigen Begrenzung von Erdgas kommt diesem CO<sub>2</sub>-armen Energieträger, insbesondere wenn auf lange Sicht drastische Minderungen (im Bereich von 80 bis 90 Prozent) der energiebedingten CO<sub>2</sub>-Emissionen notwendig sind, wohl eher die Aufgabe zu, in einer Übergangsphase die mit hohen CO<sub>2</sub>-Emissionen verbundenen fossilen Energieträger schneller zu ersetzen und zu einer beschleunigten Minderung der CO<sub>2</sub>-Emissionen in den nächsten zwei bis drei Jahrzehnten beizutragen.

#### Substitution durch Kernenergie

Prinzipiell gilt, daß für derartig lange Zeiträume, wie sie bis zum Jahr 2050 zu betrachten sind, grundsätzliche Veränderungen der Energieversorgungsstruktur denkbar sind, da alle heute existierenden Energieanlagen bis zu diesem Zeitpunkt ohnehin ersetzt werden müssen. Anders ausgedrückt heißt dies, es könnten sich für die ferne Zukunft durch den Einsatz der Kernenergie zur Stromerzeugung, zur Fern- und Nahwärmeerzeugung, zur industriellen Prozeßdampf- und Prozeßwärmeerzeugung, zur Veredelung fossiler Energieträger und zur Wasserstoffherzeugung weitgehende technische CO<sub>2</sub>-Minderungspotentiale ergeben.

#### Substitution durch neue Sekundärenergieträger und -nutzungssysteme

Die Sauerstoff- und Methanolerzeugung aus fossilen Rohstoffen führt zu keiner absoluten Minderung der CO<sub>2</sub>-Emissionen. Dieser Weg ist nur sinnvoll als Vorstufe zur CO<sub>2</sub>-Deponierung, da die vielen dezentralen CO<sub>2</sub>-Emissionsquellen beim Endverbrauch nur auf relativ wenige zentral anfallende CO<sub>2</sub>-Emissionen konzentriert werden. Deshalb ist der Einsatz von fossil erzeugtem Wasserstoff und Methanol an den zeitlichen Rahmen der CO<sub>2</sub>-Deponie geknüpft.

#### Substitution durch CO<sub>2</sub>-Entsorgungstechniken

Die CO<sub>2</sub>-Deponierung hängt in erster Linie von der ökologischen Verträglichkeit ab. Selbst wenn diese in wenigen Jahren geklärt werden könnte, erforderte der Aufbau der Abscheideanlagen und der CO<sub>2</sub>-Transportinfrastruktur wenigstens eine Dekade, so daß ein nennenswerter Beitrag der Entsorgungstechniken zur CO<sub>2</sub>-Minderung erst nach 2005 zu erwarten wäre. Als langfristig von der Kapazität her ausreichende CO<sub>2</sub>-Deponie kommt dabei nur die Tiefsee in Betracht, wobei jedoch das Abscheiden von CO<sub>2</sub> aus Kraftwerken zu einer signifikanten Reduzierung des Wirkungsgrades führen würde. Alleine aufgrund dieser Wirkungsgradverluste dürfte nur eine CO<sub>2</sub>-Abscheidung aus Kombikraftwerken in Frage kommen.

#### 4. Literaturverzeichnis

- 1) Schnug, A.: Elektrizitätswirtschaft; in: Brennstoff, Wärme Kraft, Düsseldorf 1990
- 2) Kohler, S., u. a.: Bestandsaufnahme und Perspektiven der Atom- und Energiewirtschaft der DDR, Berlin, Darmstadt, Freiburg 1990;  
ÖKO-Institut: Energiedienstleistungsunternehmen und Least-Cost Planing, Darmstadt, Freiburg, 1989
- 3) ECH (Energie Consulting Heidelberg): Potentiale der Kraft-Wärme-Kopplung, Heidelberg 1989
- 4) Fritsche, U., Seifried, D.: Klimaschutz-Konzeption für das Land Hessen im Bereich Energie, Freiburg, Darmstadt, 1990; Henicke, P.: Least-Cost Planing — Methode, Erfahrungen und Übertragbarkeit auf die Bundesrepublik, in: Zeitschrift für Energiewirtschaft Nr. 2

#### 5. Tabellenverzeichnis

- Tab. 1: Primärenergiebedarf im Jahre 1987 und 2005 nach Energieträgern in Petajoule (PJ)
- Tab. 2: Endenergieverbrauch im Jahre 1987 und 2005 in Petajoule (PJ)
- Tab. 3: Bruttostromerzeugung im Jahre 1987 und 2005 nach Energieträgern in Terawattstunden (TWh)
- Tab. 4: Spurengasemissionen im Jahre 1987 und 2005 in Megatonnen pro Jahr (Mt/a)
- Tab. 5: Zusammenstellung der emissionsmindernden Maßnahmen für die Untervariante „Hemmnisabbau“ (1. Stufe) in Petajoule (PJ)
- Tab. 6: Vorschlag sektorspezifischer Maßnahmen:
- a) Raumwärmesektor (Ausschnitt)
  - b) Elektrogeräte, Pumpen, Ventilatoren (Ausschnitt)
  - c) Mittelständische Branchen in Industrie und im Kleinverbrauch (Ausschnitt)
  - d) Organisationen ohne Erwerbscharakter (Ausschnitt)
  - e) Verkehr (Ausschnitt)
  - f) Umwandlungssektor (Ausschnitt)
- Tab. 7: Verbrauch an fossilen und nuklearen Brennstoffen im Jahre 1987 und 2005 sowie direkte Emissionen in der Untervariante „Hemmnisabbau“



- Tab. 8: Struktur der Stromerzeugung und des Brennstoffeinsatzes im Jahre 1987 und 2005 in der Untervariante „Hemmnisabbau“
- Tab. 9: Gesamter Energieverbrauch nach Energieträgern im Jahre 1987 und 2005 im Reduktionsszenario „Energiepolitik“ mit den Untervarianten „Hemmnisabbau“ (Stufe 1) und „Energiepolitik“ (Stufe 2)
- Tab.10: Zusammenstellung der emissionsmindernden Maßnahmen für das Reduktionsszenario „Energiepolitik“ in Petajoule (PJ)
- Tab. 11: Struktur der Stromerzeugung und des Brennstoffeinsatzes im Jahre 1987 und 2005 im Reduktionsszenario „Energiepolitik“
- Tab. 12: Verbrauch an fossilen und nuklearen Brennstoffen im Jahre 1987 und 2005 sowie direkte Emissionen im Reduktionsszenario „Energiepolitik“
- Tab. 13: Investitionssummen im Zeitraum von 1987 bis 2005 und jährliche Nettokosten der Untervarianten „Hemmnisabbau“ und „Energiepolitik“ (soweit verfügbar)
- Tab. 14: Zusammenstellung der emissionsmindernden Maßnahmen in den Endenergiesektoren und im KWK-Bereich für das Reduktionsszenario „Kernenergieausstieg 2005“
- Tab. 15: Struktur der Stromerzeugung und des Brennstoffeinsatzes im Jahre 1987 und 2005 und im Reduktionsszenario „Kernenergieausstieg 2005“
- Tab. 16: Gesamter Energieverbrauch nach Energieträgern im Jahre 1987 und 2005 im Reduktionsszenario „Kernenergieausstieg 2005“
- Tab. 17: Verbrauch von fossilen Energieträgern und Kernbrennstoffen im Jahre 1987 und 2005 sowie Emissionen im Reduktionsszenario „Kernenergieausstieg 2005“
- Tab. 18: Investitionssummen in den Jahren 1987 bis 2005 und jährliche Nettokosten im Reduktionsszenario „Kernenergieausstieg 2005“
- Tab. 19: Ausgewählte Ergebnisse eines Kernenergieausstiegs bis zum Jahr 1995 in der Energiesystemstudie
- Tab. 20: Kraftwerksleistung im „Kernenergie-Ausstiegsszenario 1995“ im Jahr 2005 in Megawatt (MW)
- Tab. 21: Stromerzeugung im „Kernenergie-Ausstiegsszenario 1995“ in Terawattstunden (TWh)
- Tab. 22: Endenergiebedarf nach Sektoren im „Kernenergie-Ausstiegsszenario 1995“ in Petajoule (PJ)
- Tab. 23: Primärenergiebedarf nach Energieträgern im „Kernenergie-Ausstiegsszenario 1995“ in Petajoule (PJ)
- Tab. 24: Energiebedingte CO<sub>2</sub>-Emissionen im „Kernenergie-Ausstiegsszenario 1995“ in Millionen Tonnen
- Tab. 25: Jährliche CO<sub>2</sub>-Emissionen im Energiebereich im „Kernenergie-Ausstiegsszenario 1995“ in Millionen Tonnen (Mio./t)
- Tab. 26: Radioaktive Abfallmengen im Reduktionsszenario „Energiepolitik“
- Tab. 27: Zusammenstellung der emissionsmindernden Maßnahmen in den Endenergiesektoren im KWK-Bereich für das Reduktionsszenario „Ausbau der Kernenergie“ im Jahre 2005 in Petajoule (PJ)
- Tab. 28: Struktur der Stromerzeugung und des Brennstoffeinsatzes im Jahre 1987 und 2005 im Reduktionsszenario „Ausbau der Kernenergie“
- Tab. 29: Energieverbrauch nach Energieträgern im Jahre 1987 und 2005 im Reduktionsszenario „Ausbau der Kernenergie“
- Tab. 30: Verbrauch von fossilen Energieträgern und Kernbrennstoffen sowie Emissionen im Jahre 1987 und 2005 im Reduktionsszenario „Ausbau der Kernenergie“
- Tab. 31: Jährliche Nettokosten des Reduktionsszenarios „Ausbau der Kernenergie“ im Jahr 2005 in Millionen DM pro Jahr
- Tab. 32: Reduktion des Verbrauchs fossiler Energie und der CO<sub>2</sub>-Emissionen (absolute Werte, gemessen an den Daten von 1987)
- Tab. 33: CO<sub>2</sub>-Reduktion und Verteilung auf die Bereiche Endenergieverbrauch/Umwandlung/sonst (gemessen an den Daten von 1987)
- Tab. 34: Energieträgerstrukturen der Szenarien im Vergleich
- Tab. 35: Verteilung der Stromerzeugung auf einzelne Energieträger in Petajoule (PJ)
- Tab. 36: Brennstoffeinsatz zur Stromerzeugung ohne Kraft-Wärme- Kopplung in Petajoule (PJ)

## 6. Abbildungsverzeichnis

- Abb. 1: Beitrag der emissionsmindernden Maßnahmen zur CO<sub>2</sub>-Minderung im Reduktionsszenario „Ausbau der Kernenergie“ und deren Kosten.

## 6. KAPITEL

Überblick über das Studienprogramm der Enquete-Kommission<sup>1)</sup>**1. Bearbeiter der zusammenfassenden Energiestudie**

über „Reduktionsziele und systematische Analyse der Reduktionspotentiale der Emission von Kohlendioxid und weiteren energiebedingten klimarelevanten Spurengasen aus dem Energiebereich für die Bundesrepublik Deutschland, aufbauend auf den Ergebnissen des Studienkomplexes A.1 bis A.6 des Studienprogramms der Enquete-Kommission“:

## a) Redaktionsgruppe:

- Dr.-Ing. Eberhard *Jochem*, Fraunhofer Institut für Systemtechnik und Innovationsforschung (ISI), Karlsruhe
- Prof. Dr. Dieter *Schmitt*, Universität/Gesamthochschule Essen, FB 5, Wirtschaftswissenschaften, Lehrstuhl für Energie-Betriebswirtschaftslehre
- Prof. Dr. Alfred *Voß*, Universität Stuttgart, Institut für Energiewirtschaft und Rationelle Energieanwendung (IER), Stuttgart
- Dr. Hans-Joachim *Ziesing*, Deutsches Institut für Wirtschaftsforschung (DIW), Leiter der Abteilung Bergbau und Energiewirtschaft, Berlin

## b) Spezialaufgaben im Rahmen der Ermittlung der Variante „Ausstieg aus der Nutzung der Kernenergie“:

- Dipl.-Ing. Stephan *Kohler*, Institut für Angewandte Ökologie, (Öko-Institut e.V.), Freiburg/Breisgau

## c) Spezialaufgaben zur Berechnung der Emissionsminderungen, insbesondere im Umwandlungssektor:

<sup>1)</sup> Das Studienprogramm erscheint im Herbst 1990 in einer 10bändigen Ausgabe:

Enquete-Kommission Vorsorge zum Schutz der Erdatmosphäre: Energie und Klima – Studienprogramm „Internationale Konvention zum Schutz der Erdatmosphäre sowie Vermeidung und Reduktion energiebedingter klimarelevanter Spurengase“, Band 1: Einführung, Problemkreis Energie und Klima, Band 2: Energieeinsparung und rationelle Energienutzung und -umwandlung, Band 3: Erneuerbare Energien, Band 4: Fossile Energieträger, Band 5: Kernenergie, Band 6: Energiespeicherung und Energiesysteme, Band 7: Konzeptionelle Fortentwicklung des Verkehrsbereichs, Band 8: Energieszenario, Teil I: Weltweite Energieszenarien, Teil II: Referenzszenarien für die Bundesrepublik Deutschland, Band 9: Internationale Konvention zum Schutz der Erdatmosphäre – Untersuchung für völkerrechtliche Vereinbarungen zur Reduktion der Emissionen, energiebedingter klimarelevanter Spurengase, Band 10: Energiepolitische Handlungsmöglichkeiten und Forschungsbedarf, Bonn/Karlsruhe 1990.

– Dr. Klaus Peter *Masuhr*, Prognos AG, Basel

**2. Verzeichnis der Projektleiter der Studienkomplexe**

Studienkomplex	Bearbeiter
A.1	Dr.-Ing. Eberhard <i>Jochem</i> , Fraunhofer Institut für Systemtechnik und Innovationsforschung (FhG/ISI), Karlsruhe
A.1	Prof. Dr. Hans <i>Schaefer</i> , Forschungsstelle für Energiewirtschaft (FfE), München
A.2	Dipl.-Ing. Dr.-Ing. E. H. Ludwig <i>Bölkow</i> , Ludwig Bölkow-Systemtechnik GmbH, Ottobrunn
A.2	Prof. Dr. Michael <i>Meliß</i> , Fachhochschule Aachen, Abteilung Jülich
A.2	Dr. Hans-Joachim <i>Ziesing</i> , Deutsches Institut für Wirtschaftsforschung (DIW), Berlin
A.3	Dr. Klaus Peter <i>Masuhr</i> , Prognos AG, CH-Basel
A.3	Prof. Dr. Alfred <i>Voß</i> , Institut für Energiewirtschaft und Rationelle Energieanwendung (IER), (früher: Institut für Kernenergetik u. Energiesysteme (IKE)), Universität Stuttgart
A.4	Dipl.-Phys. Lothar <i>Hahn</i> , Öko-Institut, Freiburg im Breisgau/Darmstadt
A.4	Prof. Dr. Alfred <i>Voß</i> , Institut für Energiewirtschaft und Rationelle Energieanwendung (IER), (früher: Institut für Kernenergetik u. Energiesysteme (IKE)), Universität Stuttgart
A.5	Prof. Dr. Alfred <i>Voß</i> , Institut für Energiewirtschaft und Rationelle Energieanwendung (IER), (früher: Institut für Kernenergetik u. Energiesysteme (IKE)), Universität Stuttgart
A.5	Dr. H. J. <i>Wagner</i> , Forschungszentrum Jülich GmbH (KFA) (früher: Kernforschungsanlage Jülich), Jülich
A.6	Dr. Rainer <i>Hopf</i> , Deutsches Institut für Wirtschaftsforschung (DIW), Berlin

- |     |   |     |   |
|-----|---|-----|---|
| A.6 | Dr. Karl Otto <i>Schallaböck</i> ,<br>Institut für Landes- und Stadtentwicklungsforschung (ILS), Dortmund                             | 11. | Forschungsstelle für Energiewirtschaft (FfE), München   |
| A.6 | Prof. Dr. G. <i>Steierwald</i> ,<br>Institut für Straßen- und Verkehrswesen, Universität Stuttgart                                    | 12. | Fraunhofer-Institut für Bauphysik, IBP (FhG), Stuttgart   |
| B.  | Prof. Dr. Dieter <i>Schmitt</i> ,<br>FB 5, Energie-Betriebswirtschaftslehre, Universität/Gesamthochschule Essen                       | 13. | Fraunhofer-Institut für Solare Energiesysteme, ISE (FhG), Freiburg im Breisgau  |
| B.  | Prof. Dr. Carl Christian <i>von Weizsäcker</i> ,<br>Energiewirtschaftliches Institut (EWI) an der Universität zu Köln                 | 14. | Fraunhofer-Institut für Systemtechnik und Innovationsforschung, ISI (FhG), Karlsruhe  |
| C.  | alle Projektleiter  | 15. | Gesellschaft für Reaktorsicherheit (GRS), Garching  |
| D.  | Dr. Klaus Peter <i>Masuhr</i> ,<br>Prognos AG, Basel  | 16. | Gesellschaft zur Förderung der finanzwissenschaftlichen Forschung e.V., Finanzwissenschaftliches Institut, Köln   |
|     | Dr. Hans-Joachim <i>Ziesing</i> ,<br>Deutsches Institut für Wirtschaftsforschung (DIW), Berlin  | 17. | Ifo-Institut für Wirtschaftsforschung, München  |
| E.  | Prof. Dr. Karl <i>Kaiser</i> ,<br>Forschungsinstitut der Deutschen Gesellschaft für Auswärtige Politik e.V. (DGAP), Bonn              | 18. | Ingenieurbüro Brunner, CH-Zürich  |
| E.  | Prof. Dr. Ernst Ulrich <i>von Weizsäcker</i> ,<br>Institut für Europäische Umweltpolitik (IEUP) der Europäischen Kulturstiftung, Bonn | 19. | Ingenieurbüro für Energieberatung und Ökologische Konzepte (EBÖK), Tübingen   |
| F.  | Prof. Dr. Dieter <i>Schmitt</i> ,<br>FB 5, Energie-Betriebswirtschaftslehre, Universität/Gesamthochschule Essen                       | 20. | Ingenieurgesellschaft für Energie- und Entsorgungstechnik mbH (ARENHA), Hannover  |
| F.  | Dr.-Ing. Eberhard <i>Jochem</i> ,<br>Fraunhofer Institut für Systemtechnik und Innovationsforschung (FhG/ISI), Karlsruhe              | 21. | Ingenieurbüro Prof. Dr. Heitland, Wolfsburg   |
|     |   | 22. | Ingenieurbüro Dr. Suttor, Neckargemünd  |
|     |   | 23. | Institut für Deutsches, Europäisches und Internationales Wirtschaftsrecht der Universität Bielefeld   |
|     |   | 24. | Institut für Energie- und Umweltforschung e.V. (IFEU), Heidelberg   |
|     |   | 25. | Institut für Energiewirtschaft und Rationelle Energieanwendung (IER) (früher: Institut für Kernenergetik und Energiesysteme (IKE)), Universität Stuttgart |
|     |   | 26. | Institut für Europäische Umweltpolitik (IEUP) der Europäischen Kulturstiftung, Bonn   |
|     |   | 27. | Institut für Internationales und Ausländisches Recht und Rechtsvergleich, Freie Universität Berlin  |
|     |   | 28. | Institut für Landes- und Stadtentwicklungsforschung des Landes Nordrhein-Westfalen (ILS), Dortmund  |
|     |   | 29. | Institut für Landschaftsökonomie, FB 14, Technische Universität Berlin  |
|     |   | 30. | Institut für Landtechnik der Technischen Universität München und der Bayerischen Landesanstalt für Landtechnik, Weißenstephan                             |
|     |   | 31. | Institut für Ökologische Wirtschaftsforschung (IÖW), Berlin   |
|     |   | 32. | Institut für Politische Wissenschaften der Universität Hamburg  |
|     |   | 33. | Institut für Straßen- und Verkehrswesen (ISV), Universität Stuttgart  |
|     |   | 34. | Institut für Wasserbau, Universität Stuttgart   |
|     |   | 35. | Institut Wohnen und Umwelt (IWU), Darmstadt   |
|     |   | 36. | Kernforschungsanlage Jülich GmbH (KFA)  |
|     |   | 37. | Kernforschungszentrum Karlsruhe (KfK)   |

### 3. Verzeichnis der mit den Studien beauftragten Institute

1. Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit (BMU), Bonn; Umweltbundesamt (UBA), Berlin
2. Deutsche Forschungsanstalt für Luft- und Raumfahrt (DLR), Studiengruppe Energiesysteme, Stuttgart
3. Deutsches Institut für Wirtschaftsforschung (DIW), Berlin
4. Dolzer, Prof. Dr. Dr. Rudolf, Heidelberg
5. Energieconsulting Heidelberg
6. ENERWA Beratungsgesellschaft mbH, Köln
7. Energiewirtschaftliches Institut (EWI) an der Universität zu Köln
8. Fachhochschule Aachen, Abteilung Jülich
9. Forschungsbüro Kollert und Donderer, Bremen
10. Forschungsinstitut der Deutschen Gesellschaft für Auswärtige Politik e.V. (DGAP), Bonn
11. Forschungsstelle für Energiewirtschaft (FfE), München
12. Fraunhofer-Institut für Bauphysik, IBP (FhG), Stuttgart
13. Fraunhofer-Institut für Solare Energiesysteme, ISE (FhG), Freiburg im Breisgau
14. Fraunhofer-Institut für Systemtechnik und Innovationsforschung, ISI (FhG), Karlsruhe
15. Gesellschaft für Reaktorsicherheit (GRS), Garching
16. Gesellschaft zur Förderung der finanzwissenschaftlichen Forschung e.V., Finanzwissenschaftliches Institut, Köln
17. Ifo-Institut für Wirtschaftsforschung, München
18. Ingenieurbüro Brunner, CH-Zürich
19. Ingenieurbüro für Energieberatung und Ökologische Konzepte (EBÖK), Tübingen
20. Ingenieurgesellschaft für Energie- und Entsorgungstechnik mbH (ARENHA), Hannover
21. Ingenieurbüro Prof. Dr. Heitland, Wolfsburg
22. Ingenieurbüro Dr. Suttor, Neckargemünd
23. Institut für Deutsches, Europäisches und Internationales Wirtschaftsrecht der Universität Bielefeld
24. Institut für Energie- und Umweltforschung e.V. (IFEU), Heidelberg
25. Institut für Energiewirtschaft und Rationelle Energieanwendung (IER) (früher: Institut für Kernenergetik und Energiesysteme (IKE)), Universität Stuttgart
26. Institut für Europäische Umweltpolitik (IEUP) der Europäischen Kulturstiftung, Bonn
27. Institut für Internationales und Ausländisches Recht und Rechtsvergleich, Freie Universität Berlin
28. Institut für Landes- und Stadtentwicklungsforschung des Landes Nordrhein-Westfalen (ILS), Dortmund
29. Institut für Landschaftsökonomie, FB 14, Technische Universität Berlin
30. Institut für Landtechnik der Technischen Universität München und der Bayerischen Landesanstalt für Landtechnik, Weißenstephan
31. Institut für Ökologische Wirtschaftsforschung (IÖW), Berlin
32. Institut für Politische Wissenschaften der Universität Hamburg
33. Institut für Straßen- und Verkehrswesen (ISV), Universität Stuttgart
34. Institut für Wasserbau, Universität Stuttgart
35. Institut Wohnen und Umwelt (IWU), Darmstadt
36. Kernforschungsanlage Jülich GmbH (KFA)
37. Kernforschungszentrum Karlsruhe (KfK)

38. Lehrstuhl für Energie-Betriebswirtschaftslehre, Fachbereich 5, Universität/Gesamthochschule Essen
39. Ludwig-Bölkow-Systemtechnik GmbH, Otto-brunn
40. Max-Planck-Institut für Ausländisches Öffentliches Recht, Heidelberg
41. Max-Planck-Institut für Plasmaforschung (IPP), Garching
42. Menck, Dr., HWWA – Institut für Wirtschaftsforschung, Hamburg
43. Michaelis, Prof. Dr. Hans, Köln
44. Öko Institut e.V. (Institut für Angewandte Ökologie, Freiburg im Breisgau und Darmstadt)
45. Petersmann, Prof. Dr. E. U., GATT, Genf
46. Prognos AG, CH-Basel
47. Seifritz, Prof. Dr. W., c/o Institut für Kernenergetik und Energiesysteme (IKE), Universität Stuttgart
48. Technischer Überwachungsverein Rheinland (TÜV), Köln
49. Temaplan GmbH, Systemanalyse, Regional- und Energieplanung, Böblingen
50. Traube, Prof. Dr. Klaus, Hamburg
51. WISA-Energiesysteme GmbH, Stuttgart

#### 4. Übersicht über die Studienkomplexe

Das Studienprogramm umfaßt folgende 11 Studienkomplexe:

- A. Technisch-wirtschaftliche Analysen der Potentiale zur Verminderung des Energieverbrauchs, der Nutzung fossiler Energieträger und der Emission energiebedingter klimarelevanter Spurengase für die Bundesrepublik Deutschland (Studienkomplexe A.1 bis A.6)
- A1. Energieeinsparung durch rationellere Energienutzung und Verminderung der Energiedienstleistung
- A2. Nutzung erneuerbarer Energiequellen
- A3. Austausch fossiler Energieträger untereinander
- A4. Nutzung der Kernenergie
- A5. Energiespeicher, neue Sekundärenergieträger und Nutzungssysteme, Entorgungsmöglichkeiten von Kohlendioxid sowie Möglichkeiten der Emissionsminderung klimarelevanter Spurengase
- A6. Konzeptionelle Fortentwicklung des Verkehrsbereichs

- B. Analyse weltweiter Energiebedarfs- und Reduktionsszenarien für Kohlendioxid und andere klimarelevante energiebedingte Spurengase
- C. Rahmenbedingungen und Kriterien für langfristige Untersuchungen zur Bewertung von Reduktionspotentialen und Strategien zur Vermeidung und Verminderung energiebedingter klimarelevanter Spurengase
- D. Referenzszenario des Energiebedarfs und der Emissionen energiebedingter klimarelevanter Spurengase bis zum Jahr 2050 für die Bundesrepublik Deutschland ohne Berücksichtigung wesentlicher Eingriffe aufgrund des Treibhauseffekts
- E. Internationale Konvention zum Schutz der Erdatmosphäre
- F. Wirkungsanalysen energiepolitischer Instrumente und Maßnahmenbündel zur Vermeidung und Verminderung des Energieverbrauchs und der Emissionen energiebedingter klimarelevanter Spurengase

#### 5. Übersicht über die im Rahmen des Studienprogramms vergebenen Studien und beauftragten Institute

Die beauftragten Institute hatten die Möglichkeit, Unteraufträge an weitere Institute zu erteilen. Diese Institute sind jedoch in der folgenden Übersicht nicht enthalten. Die beauftragten Institute hatten die Möglichkeit, zum gleichen Studienschwerpunkt gemeinsame Studien anzufertigen.

Die folgende Übersicht über das Studienprogramm gibt in der ersten Spalte die im Rahmen des Programms festgelegte Studiennummer, in der zweiten Spalte das beauftragte Institut und in der dritten Spalte das bearbeitete Thema wieder:

Studiennummer	beauftragtes Institut	Thema
---------------	-----------------------	-------

#### Teil A des Studienprogramms

umfaßt die Studienkomplexe A.1 bis A.6 und ermittelt

technisch-wirtschaftliche Analysen der Potentiale zur Verminderung des Energieverbrauches, der Nutzung fossiler Energieträger und der Emission energiebedingter klimarelevanter Spurengase für die Bundesrepublik Deutschland

**Studienkomplex A.1**

Energieeinsparung durch rationellere Energienutzung und Verminderung der Energiedienstleistung

Studennummer	Institut	Thema
A.1.1.a	Forschungsstelle für Energiewirtschaft (Ffe), München	Energiestrukturmatrix und Emissionszahlenmatrix zur Bewertung der Emissionsminderungspotentiale
A.1.1.b	Öko-Institut e.V., Freiburg i. Br./Darmstadt	Energiestrukturmatrix und Emissionszahlenmatrix zur Bewertung der Emissionsminderungspotentiale
A.1.2.a	Fraunhofer Institut für Bauphysik, IBP (FhG), Stuttgart	Neubau und Erweiterungsbau von Wohngebäuden
A.1.2.b	Institut Wohnen und Umwelt (IWU),	Altbaumodernisierung und -sanierung bei Wohngebäuden Darmstadt
A.1.2.c	Forschungsstelle für Energiewirtschaft (Ffe), München	Heiztechnik und zentrale Warmwasserbereitung
A.1.2.d	Fraunhofer Institut für Solare Energiesysteme, ISE (FhG), Freiburg i.Br.	Passive Solarenergienutzung im Neu- und Altbau in Wohn- und Nichtwohnbauten durch transluzente Wärmedämmung
A.1.3.a	Forschungsstelle für Energiewirtschaft, (Ffe), München	Waschen (einschl. Trocknen), Geschirrspülen, Licht und Fernsehen
A.1.3.b	Ingenieurbüro für Energieberatung und Ökologische Konzepte (EBÖK), Tübingen	Dezentrale Warmwasserbereitung (als Elektrodurchlauferhitzer und -boiler) Kühlen Gefrieren, Kochen, Backen
A.1.4.a	Institut für Energie- und Umweltforschung e.V. (IFEU), Heidelberg	Personenverkehr (Straße, Schiene, Luft)
A.1.4.b	Technischer Überwachungsverein Rheinland (TÜV), Köln	Güterverkehr (Straße, Schiene, Luft)
A.1.5.a	Ingenieur-Büro Brunner, Zürich	Gebäude, Neubau und Sanierung von Verwaltungs- und Bürogebäuden wie Schulen, Geschäfts- und Kaufhäusern, von Hotels und ähnlichen Gebäuden
A.1.5.b	Forschungsstelle für Energiewirtschaft (Ffe), München	Gewerbe
A.1.6.a	Forschungsstelle für Energiewirtschaft (Ffe), München	Investitionsgüter, Verbrauchsgüter und Nahrungsmittelindustrie

Studennummer	Institut	Thema
A.1.6.b	Fraunhofer Institut für Systemtechnik und Innovationsforschung, ISI (FhG), Karlsruhe	Ausgewählte Branchen und Technologien der Grundstoffindustrie
A.1.7.a	Energieconsulting Heidelberg	Neue Kraftwerksgenerationen, große KWK-Anlagen, Transport und Verteilung von leitungsgebundenen Energieträgern, Raffinerien
A.1.7.b	Ingenieur-Büro Suttor, Neckargemünd	Kleine KWK-Anlagen einschließlich verbrennungsmotorischer und gasturbinenbetriebener Systeme
A.1.8.a	ENERWA-Beratungsgesellschaft mbH, Köln	Private Haushalte, öffentliche Hand, Verkehr
A.1.8.b	Fraunhofer Institut für Systemtechnik und Innovationsforschung, ISI (FhG), Karlsruhe	Industrie, Gewerbe im Kleinverbrauch, Umwandlung, insbesondere KWK
A.1.8.c	Ingenieurbüro für Energieberatung und Ökologische Konzepte, (EBÖK), Tübingen	Strom- und Wärmeeinsparung in ausgewählten Sektoren
Projektleitung A.1	Dr.-Ing. E. Jochem, Fraunhofer-Institut für Systemtechnik und Innovationsforschung ISI (FhG), Karlsruhe	Zusammenfassung
Projektleitung A.1	Prof. Dr. H. Schaefer, Forschungsstelle für Energiewirtschaft (Ffe), München	Zusammenfassung

## Studienkomplex A.2

### Nutzung erneuerbarer Energiequellen

A.2.1.a	Fraunhofer Institut für solare Energiesysteme, ISE (FhG), Freiburg i. Br.	Photovoltaik
A.2.1.b	Ludwig Bölkow Systemtechnik GmbH, Ottobrunn	Photovoltaik
A.2.2.a	Ludwig Bölkow Systemtechnik GmbH, Ottobrunn	Windenergie
A.2.2.b	WISA Energiesysteme GmbH, Stuttgart	Windenergie
A.2.3.a	Deutsches Institut für Wirtschaftsforschung (DIW), Berlin	Wasserkraft
A.2.3.b	Institut für Wasserbau, Universität Stuttgart	Wasserkraft

Studiennummer	Institut	Thema
A.2.4.a	Ingenieurgesellschaft für Energie- und Entsorgungstechnik mbH (ARENHA), Hannover	Biomasse
A.2.4.b	Deutsches Institut für Wirtschaftsforschung (DIW), Berlin	Biomasse
A.2.4.c	Institut für Landtechnik der Technischen Universität München und der Bayerischen Landesanstalt für Landtechnik, Weihenstephan	Nachwachsende Rohstoffe
A.2.5.a	Deutsche Forschungsanstalt für Luft- und Raumfahrt (DLR), Studiengruppe Energiesysteme, Stuttgart	Solarkollektoren und solare Nahwärmesysteme
A.2.5.b	Fraunhofer Institut für Systemtechnik und Innovationsforschung, ISI (FhG), Karlsruhe	Solarkollektoren und solare Nahwärmesysteme
A.2.6.a	Deutsche Forschungsanstalt für Luft- und Raumfahrt (DLR), Studiengruppe Energiesysteme, Stuttgart	Solare Großanlagen (einschließlich Import und Speicherung)
A.2.6.b	Ludwig Bölkow Systemtechnik GmbH, Ottobrunn	Solare Großanlagen (einschließlich Import und Speicherung)
A.2.7.a	Deutsches Institut für Wirtschaftsforschung (DIW), Berlin	Wärmepumpen
A.2.7.b	Forschungsstelle für Energiewirtschaft (Ffe), München	Wärmepumpen
A.2.8	Öko-Institut, Freiburg i. Br.	Hemmnisse und Maßnahmen
Projektleitung A.2	Dr. L. Bölkow, Ludwig Bölkow Systemtechnik GmbH, Ottobrunn	Zusammenfassung
Projektleitung A.2	Prof. Dr. M. Meliß, Fachhochschule Aachen Abt. Jülich	Zusammenfassung
Projektleitung A.2	Dr. H.-J. Ziesing, Deutsches Institut für Wirtschaftsforschung (DIW), Berlin	Zusammenfassung

Studennummer	Institut	Thema
<b>Studienkomplex A.3</b>		
Austausch fossiler Energieträger untereinander		
A.3.1	Temaplan GmbH, Systemanalyse, Regional- und Energieplanung, Böblingen	Analyse der Förderpotentiale und langfristigen Verfügbarkeit von Kohle, Erdgas u. Mineralöl – weltweit und für die Bundesrepublik Deutschland (unter Einschluß von Erdgas nicht fossilen Ursprungs)
A.3.2	Institut für Kernenergetik und Energiesysteme (IKE), Universität Stuttgart	Abschätzung der technischen und wirtschaftlichen Kohlendioxid-Reduktionsmöglichkeiten durch eine verstärkte Nutzung kohlenstoffarmer Energieträger
A.3.3.a	Ludwig Bölkow Systemtechnik GmbH, Ottobrunn	Energiebedingte Methan-Emission in Zusammenhang mit der Gewinnung, Umwandlung, Verteilung und Nutzung der fossilen Energieträger Kohle, Erdöl und Erdgas
A.3.3.b	Ludwig Bölkow Systemtechnik GmbH, Ottobrunn	Durch energetische Nutzung reduzierbare Methan-Emissionen z. B. aus Mülldeponien, aus der Gülleverwertung, aus Klärwerken u. a.
A.3.3.c	Temaplan GmbH, Systemanalyse, Regional- und Energieplanung, Böblingen	Energiebedingte Methan-Emissionen im Zusammenhang mit der Gewinnung, Umwandlung, Verteilung und Nutzung der fossilen Energieträger Kohle, Erdöl und Erdgas
Projektleitung A.3	Dr. K.-P. Masuhr Prognos AG, Basel	Zusammenfassung
Projektleitung A.3	Prof. Dr. A. Voß, Institut für Energiewirtschaft und Rationelle Energieanwendung (IER) (früher: Institut für Kernenergetik und Energiesysteme (IKE)), Universität Stuttgart	Zusammenfassung

**Studienkomplex A.4**

Nutzung der Kernenergie

A.4.1.a	Kernforschungsanlage Jülich GmbH (KFA)	Darstellung des Standes und der Entwicklungsmöglichkeiten von Kernspaltungsreaktoren
A.4.1.b	Institut für Kernenergetik und Energiesysteme (IKE), Universität Stuttgart	Darstellung des Standes und der Entwicklungsmöglichkeiten von Kernspaltungsreaktoren



Studennummer	Institut	Thema
A.4.1.c	Kernforschungszentrum Karlsruhe (KfK)	Darstellung des Standes und der Entwicklungsmöglichkeiten von Kernspaltungsreaktoren
A.4.1.d	Prof. Dr. K. Traube, Hamburg	Darstellung des Standes und der Entwicklungsmöglichkeiten von Kernspaltungsreaktoren; Stellungnahme zu A.4.1.a/A.4.1.b/A.4.1.c
A.4.2.a	Institut für Kernenergetik und Energiesysteme (IKE), Universität Stuttgart	Abschätzung der technischen und wirtschaftlichen Potentiale des Beitrags der Energieversorgung und zur Minderung klimarelevanter Spurengase durch Kernenergie in der Bundesrepublik Deutschland
A.4.2.b	Kernforschungsanlage Jülich GmbH (KFA)	Abschätzung der technischen und wirtschaftlichen Potentiale des Beitrags der Energieversorgung und zur Minderung klimarelevanter Spurengase durch Kernenergie in der Bundesrepublik Deutschland
A.4.2.c	Prof. Dr. K. Traube, Hamburg	Abschätzung der technischen und wirtschaftlichen Potentiale des Beitrags der Energieversorgung und zur Minderung klimarelevanter Spurengase durch Kernenergie in der Bundesrepublik Deutschland; Stellungnahme zu A.4.2.a und A.4.2.b
A.4.3.a	Öko-Institut e.V. Freiburg i. Br./ Darmstadt	Umwelt-, Sicherheits-, Entsorgungs- und Akzeptanzaspekte der Kernenergienutzung
A.4.3.b	Forschungsbüro Kollert und Donderer, Bremen	Klimaaspekte radioaktiver Spurengase
A.4.3.c	Gesellschaft für Reaktorsicherheit Garching (GRS)	Umwelt-, Sicherheits-, Entsorgungs- und Akzeptanzaspekte der Kernenergienutzung
A.4.3.d	Kernforschungszentrum Karlsruhe (KfK)	Umwelt-, Sicherheits-, Entsorgungs- und Akzeptanzaspekte der Kernenergienutzung
A.4.3.e	Kernforschungszentrum Karlsruhe (KfK)	Klimaaspekte radioaktiver Spurengase
A.4.3.f	Kernforschungsanlage Jülich GmbH (KFA)	Umwelt-, Sicherheits-, Entsorgungs- und Akzeptanzaspekte der Kernenergienutzung
A.4.3.g	Institut für Kernenergetik und Energiesysteme (IKE), Universität Stuttgart	Umwelt-, Sicherheits-, Entsorgungs- und Akzeptanzaspekte der Kernenergienutzung
A.4.4	Max-Planck-Institut für Plasmaforschung (IPP), Garching	Kernfusion

Studennummer	Institut	Thema
Projekt- leitung A.4	Dipl.-Phys. L. Hahn, Öko-Institut e.V., Freiburg i. Br./ Darmstadt	Zusammenfassung
Projekt- leitung A.4	Prof. Dr. A. Voß, Institut für Kernenergetik und Energiesysteme (IKE), Universität Stutt- gart	Zusammenfassung

### Studienkomplex A.5

Energiespeicher, neue Sekundärenergieträger und Nutzungssysteme, Entsorgungsmöglichkeiten von Kohlendioxid sowie Möglichkeiten der Emissionsminderung klimarelevanter Spurengase

A.5.1.a	Ingenieurbüro Prof. Dr. H. Heitland, Wolfsburg	Möglichkeiten und Potentiale neuer Kraftstoffe und An- triebe im Verkehr
A.5.1.b	Institut für Straßen- und Verkehrswesen (ISV), Universität Stuttgart	Neue Verkehrssysteme, Sub- stitution bzw. Verlagerung von Verkehrsleistungen, Ver- kehrsplanung sowie Umlenkung von Verkehrsströmen
A.5.1.c	Institut für Landes- und Stadtentwicklungs- forschung des Landes Nordrhein-Westfalen (ILS), Dortmund	Entwurf des Studienkomplexes A.6: „Konzeptionelle Fort- entwicklung des Verkehrsbe- reichs“
A.5.1.d	Deutsches Institut für Wirtschaftsforschung (DIW), Berlin	Entwurf des Studienkomplexes A.6: „Konzeptionelle Fort- entwicklung des Verkehrsbe- reichs“
A.5.2.a. (1)	Deutsche Forschungsan- stalt für Luft- und Raumfahrt (DLR), Stuttgart	Überblick über den tech- nischen Stand von Energie- speichern
A.5.2.a. (2)	Deutsche Forschungsan- stalt für Luft- und Raumfahrt (DLR), Stuttgart	Speicherung nicht-elektri- scher Energie
A.5.2.a. (3)	Forschungsstelle für Energiewirtschaft (Ffe), München	Speicherung elektrischer Energie und mechanischer Energie
A.5.2.b. (1)	Deutsche Forschungs- anstalt für Luft- und Raumfahrt (DLR), Stuttgart	Wasserstoff-Erzeugungs- (Elektrolyse-), Transport-, Speicher- und Nutzungs- Systeme
A.5.2.b. (2)	Kernforschungsanlage Jülich GmbH (KFA)	Wasserstoff aus fossilen Energieträgern
A.5.2.c	Kernforschungsanlage Jülich GmbH (KFA)	Sonstige Sekundärenergie- träger
A.5.3	Prof. Dr. W. Seifritz, c/o Institut für Kern- energetik (IKE), Uni- versität Stuttgart	Entsorgungsmöglichkeiten von Kohlendioxid

Studiennummer	Institut	Thema
A.5.4	Institut für Kernenergetik und Energiesysteme (IKE), Universität Stuttgart	Möglichkeiten der Emissionsminderung von Stickoxiden und anderen ozonbildenden Spurengasen
A.5.5	Institut für Kernenergetik und Energiesysteme (IKE), Universität Stuttgart	Systemare Einordnung, Gesamtpotentiale, Hemmnisse
Projekt- leitung A.5	Dr. H. J. Wagner, Kernforschungsanlage Jülich GmbH (KFA)	Zusammenfassung
Projekt- leitung A.5	Prof. Dr. A. Voß, Institut für Kernenergetik und Energiesysteme (IKE), Universität Stuttgart	Zusammenfassung

### Studienkomplex A.6

Konzeptionelle Fortentwicklung des Verkehrsbereichs

A.6.1	Deutsches Institut für Wirtschaftsforschung (DIW), Berlin	Aufbereitung der Verkehrsdaten sowie Maßnahmenprogramm zu Ordnungspolitik, Preispolitik, Investitionspolitik, Organisatorische Maßnahmen, Veränderung der Einstellung, a) Trend-Szenario, b) Reduktions-Szenario
A.6.2	Institut für Landes- und Stadtentwicklungsforschung des Landes Nordrhein-Westfalen (ILS), Dortmund	Maßnahmenprogramm zur Flächennutzungspolitik im Verkehrsbereich a) Trend-Szenario b) Reduktions-Szenario
A.6.3	Institut für Straßen- und Verkehrswesen (ISV), Universität Stuttgart	Maßnahmenprogramm zur Technologieentwicklung im Verkehrsbereich a) Trend-Szenario b) Reduktions-Szenario
A.6.4	Institut für Energie- und Umweltforschung e.V. (IFEU), Heidelberg	Abschätzung des Energieverbrauchs und der Emissionen im Verkehrsbereich, Trend- und Reduktions-Szenario
A.6.5	Technischer Überwachungsverein (TÜV) Rheinland, Köln	Abschätzung des Energieverbrauchs und der Emissionen im Verkehrsbereich, Trend- und Reduktions-Szenario
Projekt- leitung A.6	Dr. R. Hopf, Deutsches Institut für Wirtschaftsforschung (DIW), Berlin	Zusammenfassung
Projekt- leitung A.6	Dr. K. O. Schallaböck, Institut für Landes- und Stadtentwicklungsforschung (ILS) des Landes Nordrhein-Westfalen, Dortmund	Zusammenfassung

Stu­di­en­num­mer	Institut	Thema
Projekt­lei­tung A.6	Prof. Dr. G. Steierwald, Institut für Straßen- und Ver­kehrs­we­sen (ISV), Uni­ver­si­tät Stuttgart	Zusammenfassung

### Studienkomplex B

Analyse weltweiter Energiebedarfs- und Reduktions-Szenarien für Kohlendioxid und andere energiebedingte klimarelevante Spurengase

B.1.a	Deutsches Institut für Wirtschaftsfor- schung (DIW), Berlin	Einschätzung der Bereit- schaft und Fähigkeit ausge- wählter Länder (-gruppen) zur Reduktion von Kohlenmon- oxid und anderen klimarele- vanter energiebedingten Spu- rengase bis zum Jahr 2005, insbesondere bzgl. der Län- dergruppen RGW-Länder, Ent- wicklungsländer, USA
B.1.b	Energiewirtschaftli- ches Institut (EWI) an der Universität zu Köln	Einschätzung der Bereit- schaft und Fähigkeit ausge- wählter Länder (-gruppen) zur Reduktion von Kohlen- dioxid und anderen klimare- levanten energiebedingten Spurengasen bis zum Jahr 2005, insbesondere bzgl. der Ländergruppen EG-Mitglieds- staaten, VR China, Indien, Japan
B.1.c	Prognos AG, Basel	Einschätzung der Bereit- schaft und Fähigkeit ausgewählter Länder (-gruppen) zur Reduktion von Kohlendi- oxid und anderen klimarele- vanen energiebedingten Spu- rengasen bis zum Jahr 2005 (begleitende Beratung)
B.2.a	Deutsches Institut für Wirtschaftsforschung (DIW), Berlin	Kritische Aufarbeitung und Vergleich vorliegender welt- weiter Energieverbrauchs- und Reduktionsszenarien für Kohlendioxid und andere kli- marelevante energiebedingte Spurengase bis zum Jahr 2050 (begleitende Beratung)
B.2.b	Energiewirtschaftli- ches Institut (EWI) an der Universität zu Köln	Kritische Aufarbeitung und Vergleich vorliegender welt- weiter Energieverbrauchs- Reduktionsszenarien für Koh- lendioxid und andere kli- marelevante energiebedingte Spurengase bis zum Jahr 2050
B.2.c	Prognos AG, Basel	Kritische Aufarbeitung und Vergleich vorliegender welt- weiter Energieverbrauchs- und Reduktionsszenarien für Kohlendioxid und andere kli- marelevante energiebedingte Spurengase bis zum Jahr 2050 (begleitende Beratung)

Studiennummer	Institut	Thema
Projekt- leitung B	Prof. Dr. C. C. v. Weizsäcker, Energiewirtschaft- liches Institut (EWI) an der Universität zu Köln	Zusammenfassung
Projekt- leitung B	Prof. Dr. D. Schmitt, FB 5, Energie-BWL, Universität Essen	Zusammenfassung

### Studienkomplex C

Rahmenbedingungen und Kriterien für langfristige Untersuchungen zur Bewertung von Reduktionspotentia-  
len und Strategien zur Vermeidung und Verminderung energiebedingter klimarelevanter Spurengase

Die Pro- jektlei- ter aller Studien- komplexe	Dipl.-Ing. Dr. Ing. E.h. L. Bölkow, Ludwig-Bölkow-Systemtechnik GmbH, Ottobrunn
	Dipl.-Phys. L. Hahn, Öko-Institut e.V., Freiburg im Breisgau/ Darmstadt
	Dr. R. Hopf, Deutsches Institut für Wirtschaftsforschung (DIW), Berlin
	Dr.-Ing. E. Jochem, Fraunhofer-Institut für Systemtechnik und In- novationsforschung, ISI (FhG), Karlsruhe
	Prof. Dr. K. Kaiser, Forschungsinstitut der Deutschen Gesellschaft für Auswärtige Politik e.V., Bonn
	Dr. K. P. Masuhr, Prognos AG, Basel
	Prof. Dr. M. Meliß, Fachhochschule Aachen, Abt. Jülich
	Prof. Dr. H. Schaefer, Forschungsstelle für Energiewirtschaft (Ffe), München
	Dr. K. O. Schallaböck, Institut f. Landes- und Stadtentwicklungsfors- chung (ILS), Dortmund
	Prof. Dr. D. Schmitt, FB 5, Energie-BWL Universität Essen
Prof. Dr. G. Steierwald Institut für Straßen- und Verkehrswesen (ISV), Universität Stuttgart	

Stutiennummer	Institut	Thema
	Prof. Dr. A. Voß, Institut für Energiewirt- schaft und Rationelle Energie- anwendung (IER) (früher: Institut für Kernener- getik und Energiesy- steme (IKE)), Universität Stuttgart	
	Dr. H. J. Wagner, Forschungszentrum Jülich GmbH (KFA) (früher: Kernforschungsanlage Jülich GmbH)	
	Prof. Dr. C. C. v. Weizsäcker, Energiewirtschaftliches Institut (EWI) an der Universität zu Köln	
	Prof. Dr. E. U. v. Weizsäcker, Institut für Europäische Umweltpolitik (IEUP) der Europäischen Kulturstiftung, Bonn	
	Dr. H.-J. Ziesing, Deutsches Institut für Wirtschaftsforschung (DIW), Berlin	

### Studienkomplex D

Referenzszenario des Energiebedarfs und der Emissionen energiebedingter klimarelevanter Spurengase bis zum Jahr 2050 für die Bundesrepublik Deutschland ohne Berücksichtigung wesentlicher Eingriffe aufgrund des Treibhauseffekts

D.1.a	Prognos AG, Basel	Referenzszenario bis 2005
D.1.b	Institut für Kern- energetik und Ener- giesysteme (IKE), Universität Stuttgart	Referenzszenario bis 2005
D.2.a	Prognos AG, Basel	Referenzszenario bis 2050
D.2.b	Institut für Kern- energetik und Ener- giesysteme (IKE), Universität Stuttgart	Referenzszenario bis 2050
Projekt- leitung D	Dr. K. P. Masuhr, Prognos AG, CH- Basel	Zusammenfassung
Projekt- leitung D	Dr. H. – J. Ziesing, Deutsches Institut für Wirtschaftsfor- schung (DIW), Berlin	Zusammenfassung

Studennummer	Institut	Thema
<b>Studienkomplex E</b>		
Internationale Konvention zum Schutz der Erdatmosphäre		
E.1.a.	Institut für Internationales und Ausländisches Recht und Rechtsvergleichung, Freie Universität Berlin	Abgrenzung der einschlägigen Kompetenzen zwischen EG und Mitgliedsländern
E.1.b	Institut für Deutsches, Europäisches und Internationales Wirtschaftsrecht der Universität Bielefeld	Abgrenzung der einschlägigen Kompetenzen zwischen EG und Mitgliedsländern
E.2.a	Institut für Europäische Umweltpolitik (IEUP) der Europäischen Kulturstiftung, Bonn Raimund Bleischwitz	Bisherige Maßnahmen und politische Entwicklungstendenzen der Umweltpolitik der EG und ihrer Mitgliedsstaaten
E.2.b	Energiewirtschaftliches Institut (EWI) an der Universität zu Köln	Die Auswirkungen der bisherigen Energiepolitik auf die CO <sub>2</sub> -, CH <sub>4</sub> -, NO <sub>x</sub> - etc. Situation
E.3.a	Institut für Ökologische Wirtschaftsforschung (IÖW), Berlin	Effizienzanalyse, insbesondere bzgl. der Umweltpolitik
E. 3.b	Institut für Internat. und Ausländisches Recht und Rechtsvergleichung, Freie Universität Berlin	Rechtliche Analysen
E.4	Forschungsinstitut der Deutschen Gesellschaft für Auswärtige Politik e.V. (DGAP), Bonn	Elemente eines Rahmenabkommens
E.5	Prof. Dr. Dr. R. Dolzer, Heidelberg	Institutionelle Ausgestaltung eines Abkommens
E.6	Max-Planck-Institut für Ausländisches Öffentliches Recht, Heidelberg Dr. Lothar Gündling	Revisionsklausel
E.7.a	Institut für politische Wissenschaft der Universität Hamburg, Prof.Dr. Rainer Tetzlaff	Unterstützung der Entwicklungsländer durch Industriestaaten
E.7.b	Dr. Menck, HWWA – Institut für Wirtschaftsforschung, Hamburg	Unterstützung der Entwicklungsländer durch Industriestaaten – Verbesserung des Technologietransfers
E.8	Prof. Dr. Hans Michaelis, Köln	Prinzip der Freiheit der Wahl der Mittel der nationalen Durchführung der Zielsetzung
E.9.a	Institut für Landschaftsökonomie, FB 14, Technische Universität Berlin, Prof. Dr. Volkmar Hartje	Verteilung der Reduktionspflichten – Problematik der Dritten-Welt-Staaten

Studiennummer	Institut	Thema
E.9.b (1)	Kernforschungsanlage Jülich (KFA)	Verteilung der Reduktionspflichten/Verifikation
E.9.b (2)	Prof. Dr. Dr. Rudolf Dolzer, Heidelberg	Sanktionen im Falle der Nichtbefolgung von Verpflichtungen
E.10.a (1)	Institut für Europäische Umweltpolitik (IEUP) der Europäischen Kulturstiftung, Bonn Raimund Bleischwitz	Prinzip des schrittweisen regionalen Vorgehens, Vorreiterrolle der EG
E.10.a (2)	Institut für Europäische Umweltpolitik (IEUP) der Europäischen Kulturstiftung, Bonn Dr. Gerhard Maier-Rigaud	Rolle der EG im Verkehrssektor
E.10.b	Prof. Dr. Hans Michaelis, Köln	Prinzip des schrittweisen regionalen Vorgehens
E.12.a	Prof. Dr. E.U. Petersmann, GATT, Genf	Internationale Arbeitsteilung/Rechtliche Aspekte
E.12.b	Energiewirtschaftliches Institut (EWI) an der Universität zu Köln	Internationale Arbeitsteilung/Ökonomische Aspekte
E.13	Prof. Dr. Hans Michaelis, Köln	Differenzierung der Reduktionspflichten und Strukturelemente einer internationalen Konvention zum Schutz der Erdatmosphäre
Projekt- leitung E	Prof. Dr. Karl Kaiser, Forschungsinstitut der Deutschen Gesellschaft für Auswärtige Politik e.V. (DGAP), Bonn	Zusammenfassung <sup>1)</sup>
Projekt- leitung E	Prof. Dr. Ernst Ulrich von Weizsäcker, Institut für Europäische Umweltpolitik (IEUP) der Europäischen Kulturstiftung, Bonn	Zusammenfassung <sup>1)</sup>

### Studienkomplex F

Wirkungsanalysen energiepolitischer Instrumente und Maßnahmenbündel zur Vermeidung und Verminderung des Energieverbrauchs und der Emission energiebedingter klimarelevanter Spurengase

F.1	Energiewirtschaftliches Institut (EWI) an der Universität zu Köln	Vergleich von Maßnahmen aus den Potentialstudien
F.2.a	Energiewirtschaftliches Institut (EWI) an der Universität zu Köln	Analyse und systematische Darstellung global wirkender Instrumente
F.2.b	Gesellschaft zur Förderung der finanzwissenschaftlichen Forschung e.V., Köln	Analyse und systematische Darstellung global wirkender Instrumente

<sup>1)</sup> Die Zusammenfassung des Studienkomplexes E diente als Basis für Abschnitt F dieses Berichtes.



Stu­di­en­num­mer	Institut	Thema
F.3.a	Fraunhofer Institut für Systemtechnik und Innovationsforschung ISI (FhG), Karlsruhe	Aufbereitung von Erkenntnissen über Maßnahmen zur Förderung der Energieeinsparung sowie Akzeptanz der Bevölkerung
F.3.b	Prof. Dr. Klaus Traube, Hamburg	Maßnahmen zur Förderung des Ausbaus der Nah-/Fernwärmeversorgung in Kraft-Wärme-Kopplung
F.3.c	IFO-Institut für Wirtschaftsforschung, München	Erfahrungen mit einsparpolitischen Maßnahmen in der Bundesrepublik Deutschland
F.3.d	Öko-Institut e.V., Freiburg i. Br./Darmstadt	Bedeutung des Konzeptes des Energiedienstleistungsunternehmens für die Erschließung von Potentialen der rationellen Energiebereitstellung und -nutzung und die beschleunigte Markteinführung regenerativer Energieträger Rolle des Instrumentariums des „Least-Cost-Planning“ (LCP) in der Energiewirtschaft bei der Erschließung der Einsparpotentiale und der Förderung der rationellen Energieverwendung Maßnahmen zur beschleunigten Einführung regenerativer Energieträger Steuern als Instrument zur Reduzierung der Emissionen klimarelevanter Spurengase
F.4.a	Energiewirtschaftliches Institut (EWI) an der Universität zu Köln	Internalisierung externer Effekte
F.4.b	Fraunhofer Institut für Systemtechnik und Innovationsforschung ISI (FhG), Karlsruhe	Soziale Kosten des Energieverbrauchs
F.4.c	Öko-Institut e.V., Freiburg i. Br./Darmstadt	Internalisierung von Umweltaspekten der Energienutzung, Emissionsvermeidungskosten und nichtmonetäre Kosten
Projekt­leitung F	Dr.-Ing. E. Jochem, Fraunhofer-Institut für Systemtechnik und Innovationsforschung, ISI (FhG), Karlsruhe	Zusammenfassung
Projekt­leitung F	Prof. Dr. D. Schmitt, FB 5, Energie-BWL, Universität Essen	Zusammenfassung

## Erklärung des Kommissionsvorsitzenden zu den Stellungnahmen und Voten zu Abschnitt E

Zu den Stellungnahmen und Zusatzvoten über das nationale Vorgehen zur Reduktion energiebedingter klimarelevanter Spurengase erklärt der Vorsitzende der Enquete-Kommission, Abg. Bernd Schmidbauer: Abschnitt E enthält eine Stellungnahme der Kommissionsmitglieder Prof. Dr. Meyer-Abich und Prof. Dr. Heinloth zur Nutzung der Kernenergie, die diese im Auftrag der Kommission erarbeitet haben, sowie eine Reihe von Zusatzvoten zum Energiebereich. Darin stellen jeweils einzelne oder mehrere Mitglieder teilweise noch kontroverse Wertungen zu den im Energiebereich anstehenden Fragestellungen dar und erläutern, wie sie sich eine weitere Konkretisierung der einvernehmlich getragenen Maßnahmenkonzepte im einzelnen vorstellen. Darüber hinaus werden im Zusatzvotum der Mehrheit der Mitglieder zum gesamten Energiebereich und in einem ergänzenden Votum eine Vielzahl von Aussagen zur Energiesituation in der bisherigen DDR auf der Basis der gegenwärtig bekannten – allerdings unsicheren – Datenlage getroffen, die noch im einzelnen untersucht und erörtert werden müssten.

Die Kommission hat sich vor dem Hintergrund der für diesen Bericht zur Verfügung stehenden Beratungszeit, unabhängig von ihrem grundsätzlich konsensorientierten Arbeitsstil dazu entschlossen, nicht nur die einvernehmlich getragenen Positionen darzustellen. Vielmehr soll durch diese zusätzlichen Voten zu den noch nicht ausdiskutierten Positionen und Handlungsempfehlungen die Möglichkeit eröffnet werden, die Diskussion in Politik und Öffentlichkeit auf der Basis der unterschiedlichen Konzeptionen der Kommissionsmitglieder weiterzuführen und zu weiteren Ergebnissen zu gelangen. Die Kommission hat deswegen auch einvernehmlich empfohlen, diese Fragebereiche in der kommenden Wahlperiode vertieft aufzuarbeiten.

Diese Voten sollten daher nicht dazu führen, Kritisches in den Mittelpunkt der gesamten Diskussion zu rücken, sondern nur entsprechend dem Stellenwert der damit verbundenen Fragestellungen innerhalb der Gesamtproblematik in der nächsten Zeit zu einer konstruktiven Weiterentwicklung der Diskussion in diesen Bereichen beitragen.

**Zusatzvotum der Kommissionsmitglieder Schmidbauer, Dr. Lippold (Offenbach), Frau Schmidt (Spiesen), Frau Dr. Segall, Fellner, Seesing, Prof. Dr. Dolzer, Prof. Dr. Heinloth, Prof. Dr. Michaelis, Prof. Dr. Schikarski, Prof. Dr. Seiler, Prof. Dr. Zellner zu Abschnitt E: „Nationales Vorgehen zur Reduktion energiebedingter klimarelevanter Spurengase“**

**Energie- und umweltpolitisches Programm einer vorsorgenden Politik zum Schutz der Erdatmosphäre in einem Vereinten Deutschland**

## Inhaltsverzeichnis

### 1. Zusammenfassung der Erkenntnisse und Ergebnisse

- 1.1 Stand der Diskussion
- 1.2 Grundlegende Erwägungen
- 1.3 Die wichtigsten Empfehlungen des Programms
  - 1.3.1 Empfehlungen zur Bereitstellung von Primärenergie
  - 1.3.2 Empfehlungen zur Energieumwandlung
  - 1.3.3 Empfehlungen zur Energienutzung
  - 1.3.4 Empfehlungen für den Verkehrssektor
  - 1.3.5 Eine CO<sub>2</sub>-Abgabe

### 2. Kritische Analyse der Ergebnisse des Studienprogramms

- 2.1 Auftrag und Vorgaben
  - 2.1.1 Das Studienprogramm zur Untersuchung der Möglichkeiten einer Verminderung der Emissionen
  - 2.1.2 Reduktionsziele
- 2.2 Vorgelegte Szenarien
  - 2.2.1 Das Spektrum der Szenarien
  - 2.2.2 Die Entwicklung des Primärenergieverbrauchs und der Emissionen im Rahmen des Reduktionsszenarios
  - 2.2.3 Rationelle Energieverwendung
- 2.3 Aspekte einer kritischen Analyse
- 2.4 Instrumentarium – Friktionen – Vermeidungsstreben
  - 2.4.1 Grundsätzliche Anmerkungen zu den Instrumenten
  - 2.4.2 Mengenregelnde Eingriffe
  - 2.4.3 Preis- und kostenbeeinflussende Maßnahmen (Steuern und Abgaben)
  - 2.4.4 Friktionen / Vermeidungsstreben
- 2.5 Kosten der Reduktion der CO<sub>2</sub>-Emissionen – Kostenoptimierung – begrenzte Mittel
- 2.6 Internationaler Wettbewerb
  - 2.6.1 Einbindung der deutschen Wirtschaft in den internationalen Handel
  - 2.6.2 Die Einbindung in die Europäische Gemeinschaft
  - 2.6.3 Eine CO<sub>2</sub>- oder Energie-Abgabe oder Steuer im Kontext der EG
- 2.7 Preise
  - 2.7.1 Ölpreisentwicklung
  - 2.7.2 Akzeptanz und politische Durchsetzbarkeit von Preissteigerungen

### 3. Ausdehnung auf das Gebiet der DDR – Politik zum Schutz der Erdatmosphäre in einem Vereinten Deutschland

- 3.1 Notwendigkeit einer Einbeziehung der DDR
- 3.2 Status der Energieversorgung und der Umweltbelastung in der DDR
  - 3.2.1 Status der Energieversorgung in der DDR
  - 3.2.2 Versorgung mit Strom und Fernwärme im besonderen
  - 3.2.3 Umweltbelastung, Reduktion der CO<sub>2</sub>-Emissionen
- 3.3 Ausrichtung einer Politik der Reduktion der CO<sub>2</sub>-Emissionen im Gebiet der DDR
  - 3.3.1 Warum eine Erstreckung auf den anderen Teil Deutschlands?
  - 3.3.2 Fragestellung
  - 3.3.3 Realisierungsrahmen
  - 3.3.4 Besondere Charakteristiken der Energiewirtschaft der DDR
  - 3.3.5 „Status quo-Entwicklung“ der Energieversorgung in der DDR
  - 3.3.6 Szenario einer Politik der Reduktion der CO<sub>2</sub>-Emissionen im Gebiet der DDR
  - 3.3.7 Aktionsfelder einer Politik der Reduktion der CO<sub>2</sub>-Emissionen
  - 3.3.8 Zusätzliche Aktionsmöglichkeiten im Rahmen einer Politik der Reduktion der CO<sub>2</sub>-Emissionen im Gebiet der DDR
- 3.4 Möglichkeiten einer Reduktion der CO<sub>2</sub>-Emissionen im Bereiche der Primärenergieerzeugung
  - 3.4.1 Die Braunkohleförderung
  - 3.4.2 Steinkohleeinfuhren und -verwendung
  - 3.4.3 Mineralöl
  - 3.4.4 Gas
  - 3.4.5 Erneuerbare
- 3.5 Möglichkeiten einer Reduktion der CO<sub>2</sub>-Emissionen im Bereiche der Energieumwandlung
  - 3.5.1 Mineralölverarbeitung
  - 3.5.2 Elektrizitäts- und Fernwärmeerzeugung
  - 3.5.3 Stromwirtschaftlicher Verbund
  - 3.5.4 Kernenergie
- 3.6 Möglichkeiten einer Reduktion der CO<sub>2</sub>-Emissionen im Bereiche der Energienutzung
  - 3.6.1 Haushalte und Kleinverbraucher/Niedertemperaturwärme
  - 3.6.2 Industrie/Prozeßwärme
  - 3.6.3 Verkehr
- 3.7 Die Entwicklung des Energieverbrauchs und der CO<sub>2</sub>-Emissionen im Gebiet der DDR bis zum Jahr 2005 – Versuch einer Abschätzung

- 3.8 Reduktion der CO<sub>2</sub>-Emissionen in einem Vereinten Deutschland

### 4. Rahmenbedingungen und grundlegende Optionen

- 4.1 Vorbemerkungen
- 4.2 Annahmen zur Entwicklung der Bevölkerung
  - 4.2.1 Prognos-Vorgaben
  - 4.2.2 Jüngere Voraussagen
  - 4.2.3 Berichtigte Bevölkerungsprognose
  - 4.2.4 Konsequenzen für den Energieverbrauch
- 4.3 Verfügbarkeit als energiepolitische Vorgabe
- 4.4 Bedarf und Verfügbarkeit von Primärenergieträgern
  - 4.4.1 Grundsätzliche Vorbemerkung
  - 4.4.2 Steinkohleförderung
  - 4.4.3 Braunkohleförderung im rheinischen Revier
  - 4.4.4 Optionen einer Reduktion der CO<sub>2</sub>-Emissionen durch Verbrauch heimischer Kohle im bisherigen Bundesgebiet
  - 4.4.5 Erdgasimporte
  - 4.4.6 Ölversorgung
- 4.5 Strombilanz und Stromverbund
  - 4.5.1 Wird die Versorgung mit Elektrizität gesichert sein?
  - 4.5.2 Können die erforderlichen Mittel zur Finanzierung aufgebracht werden?
- 4.6 Kernenergie
  - 4.6.1 Grundsatz
  - 4.6.2 Argumente und Gegenargumente
  - 4.6.3 Kernenergie und CO<sub>2</sub>
  - 4.6.4 Die Ausstiegs-Szenarien
  - 4.6.5 Schlußfolgerungen
  - 4.6.6 Weitere Zukunft der Kernenergie
- 4.7 Revidierte Vorstellungen über die Entwicklung des Energieverbrauchs und der Emissionen
- 4.8 Vorgehen bei der Reduktion der CO<sub>2</sub>-Emissionen und Instrumente zur Erreichung dieses Zieles
  - 4.8.1 Probleme und Fragen
  - 4.8.2 Mengenwirksame Instrumente
  - 4.8.3 Preis- und Kosten-beeinflussende Maßnahmen (Steuern und Abgaben)
  - 4.8.4 Vereinbarkeit mit den Regeln und Wettbewerbsbedingungen des Gemeinsamen Marktes
  - 4.8.5 Schrittweises Vorgehen
  - 4.8.6 Flexibilität bei der Zielverwirklichung

4.8.7 Kriterien zur Wertung der sektorspezifischen Regelungen und Maßnahmen im Bericht zu den Studienkomplexen A1 bis A6

## 5. Handlungsempfehlungen

5.0 Mittel und Wege

5.1 Energieeinfuhren und innerdeutsche Energielieferungen

5.1.1 Einfuhren von Energie aus Drittländern

5.1.2 Innerdeutsche Energielieferungen

5.2 Versorgung mit Primärenergie

5.2.0 Zielsetzung

5.2.1 Stein- und Braunkohle

5.2.2 Steinkohle

5.2.3 Braunkohle

5.2.4 Mineralöl

5.2.5 Erdgas

5.2.6 Erneuerbare (allgemein)

5.3 Erzeugung und Verteilung von Elektrizität und Fernwärme

5.3.0 Potentiale der Stromversorgung

5.3.1 Die Ordnung der leitungsgebundenen Energiewirtschaft

5.3.2 Einsatz von fossilen Energieträgern zur Stromerzeugung

5.3.3 Verbesserung der Wirkungsgrade

5.3.4 Einsatz von Erneuerbaren zur Elektrizitätserzeugung

5.3.5 Einsatz der Kernenergie zur Elektrizitätserzeugung

5.3.6 Ersetzung oder Ergänzung von Elektrizität durch Fernwärme

5.4 Wärmewirtschaft und Wärmemarkt

5.4.1 Allgemeine Ausrichtung

5.4.2 Einsatz neuer Technologien (ausgenommen Kernenergie) zur Erzeugung und Bereitstellung von Wärme

5.4.3 Einsatz von Erneuerbaren zur Erzeugung und Bereitstellung von Wärme

5.4.4 Einsatz von Kernenergie zur Erzeugung und Bereitstellung von Wärme

5.4.5 Sektorspezifische Handlungsempfehlungen für mittelständische Branchen und Organisationen ohne Erwerbscharakter

5.5 Private Energie-Nutzung und Deckung des gewerblichen Niedertemperatur-Wärmebedarfs

5.5.1 Vorbemerkungen

5.5.2 Einsparung von Wärme durch Wärmedämmung

5.5.3 Einsparung von Energie durch rationellere Energienutzung im Bereich von Haushalt und Kleinverbrauch

5.5.4 Einsparung von Energie durch Einsatz regenerativer Energien und von Wärmepumpen

5.6 Der Energieverbrauch des Verkehrssektors

5.7 Eine CO<sub>2</sub>-Abgabe

## Energie- und umweltpolitisches Programm einer vorsorgenden Politik zum Schutz der Erdatmosphäre in einem Vereinten Deutschland

### 1. Zusammenfassung der Erkenntnisse und Ergebnisse

#### 1.1 Stand der Diskussion

[1] Die Kommission hat die vorliegenden Studienberichte analysiert und diskutiert. Die Auswertung und die Erörterung der aus diesen Berichten zu ziehenden Folgerungen wurde ansatzweise diskutiert, aus zeitlichen Gründen aber nicht in allen Punkten zum Abschluß gebracht. Der Klärung bedurften sowohl die Frage, in welcher Weise die Ergebnisse auf das Gebiet der DDR<sup>1)</sup> zu erstrecken sind als auch unterschiedliche Meinungen über die von den Berichterstellern verwendeten Rahmendaten.

[2] Die hier unterzeichnenden Mitglieder der Kommission haben sich daher entschlossen, ein weiter entwickeltes energie- und umweltpolitisches Programm einer vorsorgenden Politik zum Schutz der Erdatmosphäre in einem Vereinten Deutschland zu erarbeiten und vorzustellen.

[3] Dieser Programmtext bezieht sich im wesentlichen auf die Zeit bis zum Jahre 2005. Längerfristige Entwicklungen und Ziele sind nur als Orientierungen angedeutet.

#### 1.2 Grundlegende Erwägungen

[4] Die Mitglieder der vom Deutschen Bundestag eingesetzten Enquete-Kommission, die diesem Programm zur weiteren Eindämmung der Klimaänderungen in einem vereinten Deutschland zustimmen:

— sind der Auffassung, daß der durch die Emissionen von Kohlendioxid und anderen klimawirksamen Spurengasen ausgelöste Treibhauseffekt zu einer dramatischen Änderung des Klimas führen kann, gegen die mit allen Kräften vorgesorgt werden muß;

— erwarten vor allem Abhilfe von einem weltweiten Vorgehen, konkret, von einem internationalen Übereinkommen, das — solidarisch — alle Staaten mit ins Gewicht fallenden Kohlendioxid-Emissio-

<sup>1)</sup> Die Begriffe „Bundesgebiet“ und „Gebiet der DDR“ verstehen sich stets in den Grenzen bis zum 3. Oktober 1990.

- nen zu im ganzen ausreichenden, für jeden Staat aber auch zumutbaren Reduktionen ihrer Emissionen anhält;
- gehen davon aus, daß im Rahmen dieses weltweiten Vorgehens von unserem Land bis zum Jahre 2005 eine Reduktion der Emissionen von Kohlendioxid um etwa 30 % als angemessener Beitrag erwartet wird;
  - tragen der Tatsache Rechnung, daß wir in einem vereinten Deutschland leben werden und nur noch gemeinsame, auf beide Teile Deutschlands erstreckte Aktionen sinnvoll sind;
  - sind überzeugt, daß rationellere Energieerzeugung, -umwandlung und -nutzung — hier vor allem im Wege der Effizienzsteigerung — mit der Wirkung einer deutlichen Verringerung der benötigten Mengen an Primärenergie vorrangiges Mittel zur Erreichung des Reduktionszieles sein muß;
  - erkennen andererseits aber auch an, daß sparsamer Umgang mit Energie auf technisch-wirtschaftliche Grenzen stößt und zugleich von den betroffenen Verbrauchern Einschränkungen und Opfer fordert;
  - sind gleichfalls überzeugt, daß die erneuerbaren Energien einen mit der Zeit steigenden Betrag zur Energieversorgung und damit auch zur Verringerung klimaschädlicher Emissionen leisten werden;
  - sind sich bewußt, daß das Reduktionsziel nur dadurch erreicht werden kann, daß die Verbrennung fossiler Energieträger stark eingeschränkt, d. h. der Verbrauch von Kohle, Öl und Gas deutlich vermindert wird;
  - sind sich bewußt, daß es nicht ausreicht, den Verbrauch importierter Energieträger, hier in erster Linie von Mineralöl, zu verringern, daß es vielmehr unerlässlich ist, auch den Verbrauch und damit die Förderung heimischer Steinkohle und Braunkohle deutlich zurückzuführen;
  - stellen fest, daß der jüngste Konflikt am Persischen Golf Anlaß gibt, im Rahmen eines internationalen Krisenmanagements einer möglichen Unterversorgung mit Öl vorzubeugen;
  - sehen die durch sozial- und regionalpolitische Erfordernisse gesetzten Grenzen für grundlegende Umstrukturierungen, dies vor allem mit Blick auf die Steinkohlenförderung im Bundesgebiet und die Braunkohlenförderung in beiden Teilen Deutschlands;
  - sprechen sich nachdrücklich dafür aus, daß zur Energieversorgung erneuerbare Energien in weitestgehendem Ausmaße eingesetzt werden, geben aber zu bedenken, daß in der Zeit bis zum Jahre 2005 deren Beitrag noch gering sein wird;
  - sind überzeugt, daß ein Verzicht Deutschlands auf friedliche Kernenergienutzung überaus schwierig zu verwirklichen wäre und gravierende Folgen hätte, sind sich aber bewußt, daß es nicht möglich wäre, gleichzeitig die Kohlendioxid-Emissionen in dem von unserem Land erwarteten Ausmaß zu verringern und auf den Energieversorgungs-Beitrag der gegenwärtig in Betrieb befindlichen Kernkraftwerke zu verzichten;
  - sind andererseits auch der Auffassung, daß es kurz- und mittelfristig nicht möglich sein wird, Erdgas, das sich durch besonders niedrige spezifische Kohlendioxid-Emissionen von den anderen fossilen Energieträgern abhebt, in solchen Mengen zusätzlich einzuführen, wie dies bei einem Ausstieg aus der Kernenergie unerlässlich wäre;
  - tragen der Tatsache Rechnung, daß wir wie kein anderes großes Industrieland am Welthandel teilnehmen, d. h. die deutsche Wirtschaft in den internationalen Güter- und Warenaustausch eingebunden ist, und deshalb auf Ausfuhren zu wettbewerbsfähigen Preisen angewiesen sind;
  - sind sich bewußt, daß die Verkehrswirtschaft besonderen Regeln unterworfen ist, die auch besondere Maßnahmen zur Reduktion des Energieverbrauchs des Verkehrssektors und der durch diesen Verbrauch verursachten Spurengas-Emissionen erfordern;
  - sind der Auffassung, daß die Eingriffe in die Verkehrsstruktur und die Unternehmen, die den Verkehr betreiben, ausstatten, bedienen und versorgen, besonders tief gehen müssen, soll es zu einer ausreichenden Reduktion der CO<sub>2</sub>-Emissionen kommen;
  - erkennen an, daß die Zugehörigkeit unseres Landes zur Europäischen Gemeinschaft unsere Möglichkeiten zu eigenständigem energie- und umweltpolitischem Handeln rechtlich und wirtschaftlich einschränken, und deshalb autonome nationale Maßnahmen zur Reduktion des Verbrauch fossiler Energieträger bald auf Grenzen stoßen;
  - sind sich bewußt, daß die Energiewirtschaft und hier vor allem die Elektrizitätswirtschaft im Bundesgebiet erhebliche finanzielle Anstrengungen unternehmen muß, um die Mittel für die Finanzierung der von ihr erwarteten Erneuerung und Sanierung der Energiewirtschaft im Gebiet der DDR aufzubringen und daß deshalb die Finanzmittel, über die zur Finanzierung von Maßnahmen zur Verminderung der Kohlendioxid-Emissionen verfügt werden kann, begrenzt sind;
  - sind der Meinung, daß schon im Hinblick auf die erforderlichen tiefgreifenden Änderungen der Struktur der Energieversorgung mengenregelnde Eingriffe im Bereich der fossilen Energieträger im Vordergrund stehen müssen;
  - empfehlen die Einführung einer an der Quelle zu erhebenden europaweiten CO<sub>2</sub>-Abgabe, geben aber zu bedenken, daß dies nur in den durch die Regeln des Europäischen Binnenmarktes fixierten Grenzen und in dem durch den Wettbewerb auf diesem Markte bestimmten Maße möglich sein wird;
  - sind überzeugt, daß es möglich sein wird, die erforderliche umfassende Umstrukturierung der deutschen Energieversorgung im Rahmen der beste-

henden Gesellschafts- und Wirtschaftsordnung bewältigen zu können;

- sind gleichfalls davon überzeugt, daß eine Verwirklichung der in diesem Programm ausgesprochenen Empfehlungen zu der erwarteten Reduktion der Kohlendioxid-Emissionen führen wird.

### 1.3 Die wichtigsten Empfehlungen des Programms

#### 1.3.1 Empfehlungen zur Bereitstellung von Primärenergie

[5] Die deutsche Regierung sollte in der Europäischen Gemeinschaft darauf hinwirken, daß Zölle auf die Einfuhr von Rohöl und Mineralölprodukten eingeführt werden, und sobald dies erreicht ist, auch Zölle auf die Einfuhr von Kohle und Erdgas.

[6] Die Energiemärkte der beiden Teile Deutschlands müssen integriert werden. Energieeinfuhren in das Gebiet der DDR müssen sobald wie möglich liberalisiert werden.

[7] Die Förderung von Stein- und Braunkohle in Westdeutschland sollte in einem Maße verringert werden, das noch gestattet, die Förderung der beiden wichtigen Reviere auf Dauer aufrechtzuerhalten. Damit wird aber keine Vorentscheidung getroffen, ob nicht die Förderung eines der beiden Reviere zugunsten des anderen langfristig aufgegeben wird.

[8] Die Förderung von Braunkohle des mitteldeutschen Reviers ist entsprechend den gegenwärtigen Planungen von 300 auf 160 bis 180 Mio. Jahrestonnen (jato) zu verringern.

[9] Die Einfuhr von Mineralöl sollte in einem solchen Maße reduziert werden, daß im Ergebnis das gesamte Mineralölaufkommen zur Deckung des Restbedarfs ausreicht, der nach dem Greifen aller in diesem Programm vorgesehenen Maßnahmen für das Mineralöl verbleibt. Im Zuge dieser Maßnahmen muß der DDR-Markt so schnell wie möglich für Einfuhren aus westlichen Ländern geöffnet werden. Dabei sollte in Rechnung gestellt werden, daß im Falle einer durch politische Ereignisse ausgelösten manifesten Ölversorgungskrise tiefgreifende Maßnahmen zur Reduktion des Ölverbrauches und zur Umstellung auf andere Energieträger unerlässlich werden.

[10] Die heimische Erzeugung und die Einfuhr von Erdgas, sowohl aus der Nordsee als auch aus der Sowjetunion ist, soweit dies möglich ist, auszuweiten, mit dem Ziel, diesem CO<sub>2</sub>-günstigen Energieträger einen größeren Markt zu verschaffen. Dies gilt für die beiden Teile Deutschlands, deren Versorgungssysteme integriert werden sollten.

[11] Mit den Mitteln der Förderung, Entwicklung und Markteinführung ist der Beitrag der erneuerbaren Energien zur Energierversorgung soweit wie möglich zu vergrößern.

[12] Mit dem Ziel, mehr Wettbewerb zu erreichen, ist die Ordnung der leitungsgebundenen Energiewirtschaft zu verbessern.

#### 1.3.2 Empfehlungen zur Energieumwandlung

[13] Der Einsatz von Stein- und Braunkohle zur Stromerzeugung ist nach den angepaßten Fördermengen auszurichten. Im DDR-Gebiet ist in begrenztem Umfang Einfuhrkohle zu verstromen. Die Stromerzeugung aus schwerem Heizöl ist soweit wie möglich zu verringern. Der Einsatz von Erdgas zur Stromerzeugung sollte möglichst auf Kombiprozesse ausgerichtet werden.

[14] Die Wirkungsgrade der in beiden Teilen Deutschlands eingesetzten Kraftwerke sind, soweit dies möglich ist, zu erhöhen. Dabei sollten neue Kraftwerkstechniken Eingang finden.

[15] In der Elektrizitätswirtschaft sollten schrittweise Windkraftwerke eingesetzt werden. Die Technik der Sonnenkraftwerke auf der Grundlage der Photovoltaik ist weiterzuentwickeln.

[16] Im bisherigen Bundesgebiet sollen die am Netz befindlichen Kernkraftwerke unter Beachtung der sicherheitstechnischen Erfordernisse weiter in Betrieb und deren Standorte erhalten bleiben. Über den Zubau von Kernkraftwerken – ggf. nach einem fortentwickelten LWR- oder HTR-Konzept – soll erst nach sorgfältiger Prüfung der energie- und umweltpolitischen Erfordernisse entschieden werden: Strombedarfsentwicklung, Sicherstellung der Kohlenutzung in, wenn auch reduziertem, so doch wirtschaftlichen Umfang, Verringerung der Schadstoff- und CO<sub>2</sub>-Emissionen, Wettbewerbsfähigkeit des deutschen im Vergleich zum Stromangebot aus anderen Ländern, ggf. Erfordernis von Stromlieferungen in die fünf neuen Bundesländer und in osteuropäische Länder. Unverzüglicher Handlungsbedarf besteht nicht.

Die im Gebiet der DDR in Betrieb und in Bau befindlichen Kernkraftwerke sind nach den für das Bundesgebiet geltenden Regeln sicherheitstechnisch zu prüfen. Entsprechend dem Ergebnis dieser Prüfungen sollen diese Kraftwerke entweder nach Nachrüstung weiter betrieben oder stillgelegt bzw. der Bau abgebrochen werden.

[17] Wo dies wirtschaftlich sinnvoll und für die Umwelt vorteilhaft ist, sollte die Fernwärme ausgebaut werden.

[18] Forschungs- und Entwicklungsarbeiten auf dem Gebiet des Wasserstoffs – Erzeugung, Transport, Speicherung und Nutzung – sind verstärkt fortzuführen.

[19] Die Technik des Hochtemperatur-Reaktors ist weiterzuentwickeln und zu erproben, insbesondere um Raum- und Prozeßwärme, auch zur Erzeugung von Wasserstoff, zur Verfügung zu haben.

#### 1.3.3 Empfehlungen zur Energienutzung

[20] Durch geeignete Regeln und Maßnahmen ist der Energieverbrauch der Kleinverbraucher zu verringern

[21] Mit dem Ziel einer Verminderung des Raumwärmebedarfs ist ein umfassendes Programm zur Ver-

besserung der Wärmedämmung in Alt- und Neubauten zu entwickeln und schrittweise auf den Weg zu bringen.

**[22]** Auf der Grundlage eines umfassenden Maßnahmenkatalogs soll erreicht werden, daß Energie in privaten Haushalten und bei den Kleinverbrauchern eingespart wird. Dies betrifft die Heizungs- und Lüftungssysteme und die stromsparende Geräte.

**[23]** Regenerative Energien und Wärmepumpen sollten sowohl in den privaten Haushalten als auch im sonstigen Kleinverbrauch verstärkt zum Einsatz gelangen.

### 1.3.4 Empfehlungen für den Verkehrssektor

**[24]** Es wird empfohlen, für den Bereich des Verkehrs ein Bündel von Maßnahmen zu ergreifen

- zur Verkehrsvermeidung;
- um die weitere Expansion des Strassen- und Güterverkehrs in Grenzen zu halten
- zur Verlagerung des Verkehrs auf energieeffizientere und emissionsärmere Verkehrsmittel;
- zur umweltverträglicheren Verkehrsabwicklung und gleichmässigeren Verkehrsauslastung;
- zur Verbesserung der technischen Wirkungsgrade, zur Emissionsminderung und zur Schadstoffrückhaltung der Verkehrsmittel;
- um das Verhalten der Verkehrsnutzer zu verändern.

### 1.3.5 Eine CO<sub>2</sub>-Abgabe

**[25]** Es wird empfohlen, im Rahmen der Europäischen Gemeinschaft und unter Berücksichtigung der Wettbewerbsbedingungen auf dem Europäischen Binnenmarkt eine an der Quelle zu erhebende CO<sub>2</sub>-Abgabe schrittweise einzuführen.

## 2. Kritische Analyse der Ergebnisse des Studienprogramms

### 2.1 Auftrag und Vorgaben

#### 2.1.1 Das Studienprogramm zur Untersuchung der Möglichkeiten einer Verminderung der Emissionen

**[1]** Die Studien über Mittel und Wege einer Reduktion der Emissionen im Bundesgebiet bis 2005/2050, die in den inzwischen vorliegenden Abschlußbericht vom 19.07.1990 eingehen, wurden in der zweiten Jahreshälfte 1989 vergeben. Seither haben sich entscheidende, den Studien zugrundeliegende Daten verändert. Zugleich ergaben sich neue Erkenntnisse über die zu erwartende Entwicklung.

**[2]** Vor allem konnte im Zeitpunkt der Vergabe der Studien *mit der Vereinigung der beiden deutschen Staaten* nicht gerechnet werden. Hierdurch wurden

neue Rahmendaten gesetzt. Der Tatsache, daß der Studienbericht vom 19.07.1990 ausdrücklich bezogen bleibt auf das Bundesgebiet<sup>1)</sup> das heißt das Territorium der DDR nicht einbezieht, steht nicht entgegen, daß die Perspektive eines vereinten Deutschlands auch zahlreiche Fakten und Daten für einen auf das Bundesgebiet beschränkten Bericht ändert.

### 2.1.2 Reduktionsziele

#### 2.1.2.1 Das nationale Reduktionsziel als Beitrag zur globalen Verminderung der CO<sub>2</sub>-Emissionen<sup>2)</sup>

**[3]** Wir teilen die heute von der überwiegenden Mehrheit der Klimaexperten vertretene Auffassung, daß die weltweit weiterhin ansteigenden CO<sub>2</sub>-Emissionen im Kontext mit den übrigen klimawirksamen Spurengasen einen nachhaltigen Treibhauseffekt auslösen und damit zu einer gravierenden Änderung des globalen Klimas führen werden. Es ist deshalb erforderlich, die energiebedingten klimarelevanten Spurengas-Emissionen drastisch zu verringern.

**[4]** Die mit den Studien beauftragten Institute haben in der ihnen zur Verfügung stehenden Zeit hervorragende Arbeit geleistet. Immerhin handelt es sich um die weltweit erste und einzige systematische Studie im nationalen Rahmen, die die Auswirkungen der verstärkten Emissionen klimarelevanter Spurengase analysiert und umfassende Vorschläge für Maßnahmen zur Reduktion dieser Emissionen entwickelt.

Die gewonnenen Erkenntnisse liegen dem hier vorgelegten Programm zugrunde.

**[5]** Wir rechnen damit, daß es zu einer weltweiten Klimakonvention kommen wird, die den Beitrittsstaaten auferlegt, die Emissionen klimarelevanter Schadstoffe, insbesondere von CO<sub>2</sub> angemessen zu reduzieren. In diesem Rahmen und nach den von einer solchen Konvention gesetzten Maßstäben geht die Enquete-Kommission davon aus, daß die vom Bundesgebiet ausgehenden CO<sub>2</sub>-Emissionen bis 2005 um etwa 30 Prozent vermindert werden müssen. Von der Bundesrepublik, als einem fortgeschrittenen Industrieland wird ein höherer Reduktionsbeitrag erwartet als von der ohnehin in ihrem Energieverbrauch weit zurückliegenden Dritten Welt.

#### 2.1.2.2 Tragweite

**[6]** Zum weltweiten Aufkommen an kommerzieller Primärenergie steuern die fossilen Brennstoffe derzeit etwa 88 Prozent bei. Jährlich sind dies etwa 9,5 Milliarden Tonnen Steinkohleeinheiten zu einem Marktwert von etwa einer Billion (1000 Milliarden) US-\$.

<sup>1)</sup> soweit vom „Bundesgebiet“ gesprochen wird, ist dieses zu verstehen als Territorium der Bundesrepublik Deutschland (einschl. West-Berlin) in den Grenzen bis zum 3. Oktober 1990.

<sup>2)</sup> Wie die zugrundeliegenden Studien, stellt dieses Programm allein ab auf die CO<sub>2</sub>-Emissionen. In der Bewertung der Analysen und in den Handlungsempfehlungen werden die übrigen klimarelevanten Spurengase aber angemessen berücksichtigt.

[7] Alle herkömmlichen Perspektiven der Welt-Energieversorgung sind *nicht* zu vereinbaren mit der Forderung, die Aufheizung der Atmosphäre in Grenzen zu halten. So hätte die von der vorletzten Weltenergiekonferenz in Cannes 1986 verantwortete Langzeit-Energie-Projektion „Future Stresses for Energy resources“ zur Folge, daß sich die CO<sub>2</sub>-Emissionen bis 2060 mehr als verdoppeln und nicht etwa verringern würden. In den 80iger Jahren zwischen 1980 und 2060 wird mit einer Steigerung des Primärenergieverbrauchs um jahresdurchschnittlich 1,3 Prozent insgesamt und 0,3 Prozent je Kopf der Weltbevölkerung gerechnet. Die außerordentliche Steigerung der CO<sub>2</sub>-Emissionen wird erwartet, obwohl der Anteil der fossilen Energieträgern am kommerziellen und nicht-kommerziellen Primärenergieverbrauch von gegenwärtig 80 Prozent auf 55 Prozent zurückgehen würde.

Die drei Jahre später erarbeitete und auf der letzten Weltenergiekonferenz 1989 in Montreal vorgestellte Prognose „Global Energy – Perspectives 2000–2020“ erstreckte sich nur auf die Zeit bis 2020. Diese Prognose ergibt für die 35 Jahre zwischen 1985 und 2020 einen Anstieg der CO<sub>2</sub>-Emissionen um 70 Prozent (+ 1,8 Prozent p.a.) bei moderater und um 45 Prozent (+ 1,2 Prozent p.a.) bei limitierter wirtschaftlicher Entwicklung.

### 2.1.2.3 Bundesrepublik und Torontoziele/Differenzierungen

[8] Die Enquete-Kommission hat wiederholt ihre Überzeugung zum Ausdruck gebracht, es sei möglich, und sie wolle sich dafür einsetzen, die vom Bundesgebiet ausgehenden CO<sub>2</sub>-Emissionen bis zum Jahr 2005 um 30 Prozent zu reduzieren. Mit dieser Verringerung der Emissionen um 30 Prozent müsse die Bundesrepublik dazu beitragen, daß erreicht wird, die Emissionen global um 20 Prozent zu senken. Diese Zielvorstellung wurde auch gegenüber den Studiennehmern zum Ausdruck gebracht. Heute wissen wir, daß im weltweiten Kontext unser Reduktionsbeitrag von 30 % kaum zu einer globalen Reduktion um 20 % führen wird (vgl. Abschnitt A).

### 2.1.2.4 Die von der Kommission vorgegebene CO<sub>2</sub>-Minderungsstrategie

[9] Die im Verlaufe der Abwicklung des Studienprogramms von dem Vorsitzenden der Enquete-Kommission empfohlene CO<sub>2</sub>-Minderungsstrategie für das Bundesgebiet läßt sich wie folgt charakterisieren:

Zur Verringerung der CO<sub>2</sub>-Emissionen sind zwei Aktionen vorgesehen:

- (a) Rationellere Energieverwendung mit dem Ergebnis einer Senkung der CO<sub>2</sub>-Emissionen um rund 19 Prozent, dies entspricht der *vollen* Ausschöpfung des seinerzeit in den Studien ausgewiesenen wirtschaftlichen Sparpotentials;
- (b) andere Maßnahmen, insbesondere ein erster Einsatz erneuerbarer Energien und Maßnahmen auf dem Gebiet des Verkehrs mit dem Ergebnis einer

zusätzlichen Senkung der CO<sub>2</sub>-Emissionen um 11 Prozent;

insgesamt somit eine Senkung der CO<sub>2</sub>-Emissionen um etwa 30 Prozent. Das entspricht einer Verminderung der vom Bundesgebiet ausgehenden CO<sub>2</sub>-Emissionen um rund 200 Mio. t p.a..

### 2.1.2.5 Wege und Konsequenzen

[10] Klimaerhaltende und -verbessernde Aktionen erfordern Opfer und Einschränkungen.

Die vornehmlich durch Energiesparen zu erreichende Verringerung der CO<sub>2</sub>-Emissionen wird erkaufte durch tiefgreifende und weitreichende Eingriffe in das wirtschaftliche Geschehen auf dem Energiegebiet, sei es durch Mengenregelungen unterschiedlichster Art, sei es durch preis- und kostenwirksame Maßnahmen, insbesondere Steuern und/oder Abgaben.

[11] Eine solche Reduktion kann nur im Rahmen eines umfassenden weltweiten Aktionsprogramms bewältigt werden, das weit über die Energie- und Umweltpolitik hinausreicht und die bestehende Wirtschafts- und Gesellschaftsordnung berühren könnte. Wie auch immer ein solches Aktionsprogramm aussehen wird, die Folgewirkungen der beiden vergangenen Ölkrisen und die energiepolitischen Maßnahmen zu ihrer Abhilfe werden weit in den Schatten gestellt werden.

### 2.1.2.6 Langfristige Zielsetzung

[12] Die von der Kommission in Auftrag gegebenen Studien und die daraus abgeleiteten Empfehlungen beziehen sich im wesentlichen auf die Zeitspanne bis zum Jahr 2005, das heißt darauf, mit welchen Mitteln und auf welchen Wegen Deutschland in der Lage wäre, eine Reduktion der CO<sub>2</sub>-Emissionen zu erreichen, die vereinbar ist mit dem mittelfristigen Toronto-Ziel einer globalen Reduktion der CO<sub>2</sub>-Emissionen um 20 Prozent. Insoweit kann man grundsätzlich von einem energie- und umweltpolitischen Handlungsbedarf sprechen.

Toronto hat sich aber auch ausgesprochen für eine globale Reduktion der CO<sub>2</sub>-Emissionen um 50 Prozent bis zur Mitte des nächsten Jahrhunderts. Wegen der nur begrenzt zur Verfügung stehenden Zeit hat die Enquete-Kommission nicht vertieft untersucht, ob und wie es möglich wäre, dieses Ziel weltweit zu verwirklichen und welchen Beitrag Deutschland zur Erreichung dieses Zieles leisten könnte.

Dieses ehrgeizige Ziel kann nur verwirklicht werden im Rahmen einer grundlegend veränderten Struktur der Energieversorgung der Welt. Diese Struktur muß erarbeitet und verabschiedet werden auf der Grundlage umfassender Forschungen und technologischer Entwicklungen.

Demgemäß enthalten die Studien nur einige Orientierungen für die weiter vor uns liegende langfristige Phase. Die Enquete-Kommission glaubt, daß eine vertiefte Untersuchung alsbald in Angriff genommen werden sollte.



## 2.2 Vorgelegte Szenarien

### 2.2.1 Das Spektrum der Szenarien

In „Szenarien“ werden die zugrundezulegenden Annahmen – z. B. über Verfügbarkeiten oder Preisentwicklungen – systematisch variiert um alternative Zukunftsbilder zu erhalten.

[13] Bezogen auf das Gebiet der Bundesrepublik Deutschland – das Bundesgebiet – identifiziert der von den Studiennehmern vorgelegte abschließende Bericht vom 19.07.1990 über die Zusammenfassung der Ergebnisse der Studienkomplexe A.1 bis A.6 – „A-Gesamt“ ein Referenz-Szenario und die folgenden Reduktionsvarianten für den Zeitraum 1987 bis 2005:

- 1) die Status-quo-Entwicklung des „Laissez-faire“, eine überarbeitete Version der von Prognos 1988/89 für die Bundesregierung erarbeiteten Energiebedarfsprognose;
- 2) das Reduktions-Szenario „Hemmnisabbau“ (1. Stufe des Reduktions-Szenarios);
- 3) das über das Szenario „Hemmnisabbau“ hinausgehende Reduktions-Szenario „Energiepolitik“ (2. Stufe des Reduktions-Szenarios);
- 4) das Szenario „Ausstieg aus der Kernenergie bis 2005“;
- 5) das Szenario „Ausstieg aus der Kernenergie bis 1995“;
- 6) das Szenario „Ausbau der Kernenergie“.

Neben den vorerwähnten offen ausgewiesenen sechs Szenarien wird – nicht erwartet nach den vorangegangenen Diskussionen mit den Studiennehmern – auch noch ein siebentes Szenario vorgestellt, das „Einspar-Szenario“ (z. B. Abschnitte 3.1.2, 3.2.3, 4.1.3.1, 4.1.3.3 und 4.2.1), das sich von den beiden Reduktions-Szenarien vor allem dadurch abhebt, daß es eine etwa dreimal so starke Erhöhung der Energiepreise verlangt. Die beiden Ausstiegs-Szenarien (siehe oben (4) und (5)) übernehmen weitreichend die für das Einspar-Szenario vorgesehenen Maßnahmen (Abschlußbericht Abschnitt 4.1.3.1 ff.).

#### 2.2.1.1 Grundlegende Daten

[14] Im Rahmen eines gemeinsamen „Analysesters“ einigten sich die Studiennehmer auf einige grundlegende Annahmen, vor allem die folgenden:

- die Bundesrepublik soll 2005 60 Mio. Einwohner zählen;
- das Bruttoinlandsprodukt soll bis 1995 um 2,5 Prozent p.a. und danach bis 2005 um 2,3 Prozent p.a. steigen;
- der Ölimportpreis soll real wie folgt steigen:

1987	5,90 DM(1987)/GJ	(242 DM(1987)/Tonne Öl)
1995	6,40 DM(1987)/GJ	(263 DM(1987)/Tonne Öl)
2005	9,00 DM(1987)/GJ	(369 DM(1987)/Tonne Öl).

#### 2.2.1.2 Status quo – Laissez faire

[15] Das auf das Gebiet der Bundesrepublik Deutschland begrenzte Referenz-Szenario des „Laissez-faire“ ist gekennzeichnet durch die folgenden deutlich ausgewiesenen, teilweise aber bereits in Frage gestellten *Status quo*-Annahmen:

- die Erwartung, daß sich die Bevölkerung der Bundesrepublik zwischen 1989 und 2005 um über zwei Millionen Einwohner vermindern wird (1989: 62,1 Millionen Einwohner);
- keine weitere Verschärfung der internationalen Spannungen; die kriegerischen Auseinandersetzungen am Persischen Golf stellen die Verlässlichkeit dieser Status-quo-Annahme überdeutlich in Frage;
- keinerlei wesentliche Änderungen der struktur- und ordnungspolitischen Rahmenbedingungen;
- eine tendenzielle, wenn auch verspätete und unzureichende Anpassung an neue Problemkomplexe der Energieversorgung, insbesondere steigende Umweltschutzanforderungen, die Förderungswürdigkeit erneuerbarer Energien und den kommenden europäischen Binnenmarkt;
- die Aufrechterhaltung einer Steinkohleförderung entsprechend dem Mehrheitsvotum der Mikat-Kommission;
- ein im großen und ganzen gleichbleibender Beitrag der Kernenergie zur Deckung des Energiebedarfs, das heißt weder ein Ausstieg aus der Kernenergie, noch ein Ausbau der Kernenergie;
- die Zuversicht, daß die verschärften Umweltauflagen auch greifen werden;
- eine Tendenz zur Fortsetzung des Energiesparens, ohne daß es zur Ausschöpfung der technischen Einsparpotentiale kommen wird;
- eine vor allem aufgrund der Entwicklung der Rohölpreise und der Wechselkurse bis zum Jahr 2005 erwartete Erhöhung der den Letztverbrauchern berechneten – realen – Energiepreise (einschl. Steuern) um die nachstehend bezeichneten Hundertsätze:
 

– Heizöl L	um real 63 bis 69 %
– Heizöl S	um real 52 %
– Benzin	um real 43 bis 44 %
– Diesel	um real 44 %
– Erdgas für Haushalte	um real 35 %
– Erdgas für Industrie	um real 44 %

Die Preise für Steinkohle und für Elektrizität werden sich real kaum ändern.

1987 wurde aus Energieverkäufen an Letztverbraucher insgesamt 134 Mrd. DM Erlöst. In dieser Summe wurden die Strompreise nur mit dem Preis der verstromten Brennstoffe angesetzt. Das ergibt einen Durchschnittspreis von etwa 470 DM/t SKE. In realer Rechnung führen die oben bezeichneten Preiserhö-

hungen zu einem Mehrerlös von 33 Mrd. DM p. a. oder 128 DM/t SKE.

In dem hier vorgelegten energie- und umweltpolitischen Programm wird jeweils festgestellt, ob und inwieweit diese Status-Quo-Annahmen akzeptiert oder abgelehnt werden. Im Rahmen des Szenarios ist mit der folgenden Reduktion der CO<sub>2</sub>-Emissionen zu rechnen:

CO<sub>2</sub>-Emissionen in 1987 715 Mio. t  
 CO<sub>2</sub>-Emissionen in 2005 696 Mio. t  
 Minderung um 19 Mio. t oder 2,7 %.

**[16]** Nachstehende Tabelle weist aus, wie sich die Energieversorgung der Bundesrepublik nach diesem Szenario entwickeln wird.

Tabelle 1

### Primärenergieverbrauch nach Energieträgern in Petajoule im Status-quo-Szenario

in Petajoule (10 <sup>15</sup> J)	insgesamt		energiebedingt *)	
	1987	2005	1987	2005
Steinkohle .....	2 215	1 883	2 184	1 857
Braunkohle .....	914	771	901	760
feste Brennstoffe .....	3 129	2 654	3 085	2 617
Mineralöl .....	4 785	4 252	4 199	3 731
Gase .....	1 913	2 487	1 793	2 330
Kohlenwasserstoffe .....	6 698	6 739	5 992	6 062
fossile Brennstoffe .....	9 826	9 393	9 077	8 679
andere Primärenergien .....	1 547	1 858	1 487	1 858
Insgesamt .....	11 373	11 251	10 564	10 537

\*) nicht-energetischer Verbrauch in 1988:

Kohle 44 PJ  
 Öl 586 PJ  
 Gas 120 PJ

**[17]** Ausgedrückt in für Energiewirtschaftler gebräuchlichen und verständlicheren Tonnen Steinkohleeinheiten errechnen sich die folgenden Verbräuche (1 Mio. t SKE – 29,3 PJ (1015J)):

Tabelle 2

### Primärenergieverbrauch nach Energieträgern in Millionen Tonnen Steinkohleeinheiten im Status-quo-Szenario

in Mio. t SKE	insgesamt		energiebedingt	
	1987	2005	1987	2005
Steinkohle .....	75,5	64,2 *)	74,5	63,3
Braunkohle .....	31,2 **)	26,3 ***)	30,7	25,9
feste Brennstoffe .....	106,7	90,5	105,2	89,2
Mineralöl .....	163,2	145,0	143,2	27,2
Gase .....	65,2	84,8	61,1	79,5
Kohlenwasserstoffe .....	228,4	229,8	204,3	206,7
fossile Brennstoffe .....	335,1	320,3	309,5	295,9
andere Primärenergien .....	52,8	63,4	50,7	63,4
Insgesamt .....	388,2	383,7	360,2	359,3

\*) Diese Menge stimmt in etwa mit dem Mehrheitsvotum der Mikat-Kommission überein: 65 Mio. t SKE p. a. heimische Steinkohle + 9,5 Mio. t SKE p. a. Kohleinführen

\*\*) Dies entspricht 109,6 Millionen Tonnen Rohbraunkohle (3,51 t) Rohbraunkohle = 1 t SKE)

\*\*\*) Dies entspricht 92,3 Millionen Tonnen Rohbraunkohle

**2.2.1.3 Das Reduktions-Szenario**

[18] Die erste Stufe „Hemmnisabbau“ des Reduktions-Szenarios wird wie folgt charakterisiert:

- Es wird unterstellt, daß die Energiepolitik alle wesentlichen Hemmnisse abbaut, die rationeller Energieverwendung und dem Einsatz erneuerbarer Energiequellen entgegenstehen. Neue Steuern und Abgaben auf den Energieverbrauch werden nicht erhoben.
- Für die Entwicklung der Struktur der Energieversorgung zwischen 1987 und 2005 werden die folgenden Annahmen gemacht:
  - es werden keine zusätzlichen Kernkraftwerke in Betrieb genommen. die bestehenden Kernkraftwerke werden aber besser ausgelastet.
  - Der Erdgasverbrauch erhöht sich bis 2005 von 1913 PJ (65,2 Mio. t SKE) in 1987 auf maximal 2500 PJ p.a. (85 Mio. t SKE), das heißt um maximal 31 Prozent.
  - In 2005 wird die Kraft-Wärme-Kopplung um 70 % stärker genutzt als in 1987. Die Ausbringung der Heizkraftwerke wird sich verdoppeln.

Im Rahmen diese Szenarios ist mit den folgenden Reduktionen der CO<sub>2</sub>-Emissionen zu rechnen:

CO<sub>2</sub>-Emissionen in 1987 715 Mio. t  
 CO<sub>2</sub>-Emissionen in 2005 597 Mio. t  
 Verminderung um 118 Mio. t oder 16,5 %.

[19] In der über die erste Stufe „Hemmnisabbau“ des Reduktions-Szenarios hinausgehenden zweiten Stufe „Energiepolitik“ dieses Szenarios wird vorgesehen, daß bis 2005 die Brennstoffpreise real um 5 DM/GJ (147 DM/t SKE) und die Preise für Elektrizität real um 2 Pf/kWh erhöht werden. (Diese Annahme ist widersprüchlich: die Erhöhung der Preise der Einsatzbrennstoffe für die Stromerzeugung um die bezeichneten 5 DM/GJ wird die Stromerzeugungskosten allein schon um 4,5 Pf/kWh anheben) Unter Zugrundelegung des Energieverbrauchs von 1987 ergibt dies einen realen Mehrerlös von etwa 39 Mrd. DM p.a. oder 152 DM/t SKE.

Im Rahmen dieses Szenarios ist mit der folgenden Reduktion der CO<sub>2</sub>-Emissionen zu rechnen:

CO<sub>2</sub>-Emissionen in 1987 715 Mio. t  
 CO<sub>2</sub>-Emissionen in 2005 510 Mio. t  
 Verminderung um 205 Mio. t oder 28,7 %

[20] Das Energiespar-Szenario unterscheidet sich von dem Reduktions-Szenario „Energiepolitik“ vor allem durch das Ausmaß der vorgehenden Erhöhungen der Energiepreise:

- Brennstoffe und Fernwärme um 15 DM/GJ oder 440 DM/t SKE
- Elektrizität um 7 Pf/kWh.

Auf der Grundlage des Energieverbrauchs von 1987 errechnet sich ein Mehrerlös von etwa 120 Mrd. DM p.a., in der Größenordnung etwa soviel wie die Leistungen der gesetzlichen Krankenversicherung an ihre 37 Mio. Mitglieder.

Der Abschlußbericht weist aus, daß mit diesem Szenario der Jahresenergieverbrauch bis 2005 um knapp 1140 GJ oder 39 Mio. t SKE, das heißt um rund 15 Prozent gesenkt werden könnte. Im rechnerischen Ergebnis heißt dies: die Einsparung einer Tonne SKE kostet über 3000 DM.

**2.2.1.4 Andere Szenarien**

[21] Das Szenario „Ausstieg aus der Kernenergie bis 2005“ geht von folgenden Annahmen aus:

- Die Möglichkeiten rationeller Energieverwendung werden stärker ausgeschöpft. Im Endenergiebereich werden „weitgehend die Werte aus der Energieeinspar-Variante übernommen“. Zwischen 1987 und 2005 soll im Ergebnis der Energieverbrauch für Raumwärme um 57 Prozent verringert werden. Dies übertrifft das im Grünen Energiewende-Szenario 2010 vom 21.07.1988 ausgewiesene „Technische Einsparpotential“, das dort wie folgt angesetzt wird:

Tabelle 3

**Den technischen Potentialen entsprechende Einsparraten durch Wärmedämmung**

Baualter des Hauses	Ein- und Zweifamilienhäuser	Mehrfamilienhäuser
<b>alt</b> bis 1948 .....	60 %	45 %
1948 bis 1971 .....	60 %	55 %
1971 bis 1978 .....	40 %	35 %
1978 bis 1982 .....	20 %	20 %
1982 bis 1990 .....	20 %	20 %
<b>neu</b> 1990 bis 2000 .....	30 %	35 %
2000 bis 2010 .....	35 %	45 %

Anmerkung dazu: Definitionsgemäß kann ein „technisches Potential“ nur in schrittweiser Annäherung und mit progressiv steigenden Kosten mehr und mehr ausgeschöpft werden.

Quelle: Grünes Energiewende-Szenario 2010 des Öko-Instituts Freiburg vom 21. 7. 1988

- Der Beitrag der Kraft-Wärme-Kopplung wird zusätzlich ausgeweitet. Der Brennstoffverbrauch für Kraft-Wärme-Kopplungs-Anlagen und Heizkraftenergie soll um 130 Prozent ansteigen.
- Der Einsatz erneuerbarer Energien wird erheblich beschleunigt.
- Der Erdgasverbrauch wird stärker erhöht: von 1913 PJ (65,2 Mio. t SKE) in 1987 auf 3331 PJ oder 119 Mio. t SKE (einschließlich einer kleineren Menge sonstiger Gase) in 2005, also um 74 Prozent.

Im Rahmen dieses Szenarios ist mit der folgenden Reduktion der CO<sub>2</sub>-Emissionen zu rechnen:

CO<sub>2</sub>-Emissionen in 1987 715 Mio. t  
 CO<sub>2</sub>-Emissionen in 2005 510 Mio. t  
 Verminderung um 205 Mio. t oder 28,7 %.

In der ursprünglichen Version des Berichts „A-Gesamt“ waren die Studien nur zu einer Reduktion um 24,1 Prozent gelangt. Eine mit Nachdruck von der Kommission geforderte Nachbesserung ergab dann 28,7 Prozent.

[22] Die Variante „Ausstieg aus der Kernenergie bis 1995“ ist – immer für die Zeitspanne 1987 bis 1995 – wie folgt charakterisiert:

- Der kurzfristige Verzicht auf die Nutzung der Kernenergie wird ermöglicht durch eine Erhöhung der Stromerzeugung der Kondensationskraftwerke aus fossilen Energieträgern um 50 Prozent (Steinkohle: 43 % Braunkohle: + 9 %, schweres Heizöl: + 145 % und Gase: + 206 %). Dazu sei angemerkt, daß die im Jahre 1989 verstromten Mengen an fossilen Energieträgern nahe bei denen des Jahres 1987 lagen, die Einsatzsteigerung daher innerhalb der nächsten fünf Jahre erfolgen muß.
- Im Gesamtergebnis wird sich der Verbrauch aller fossiler Energien in der Zeit bis 1995 um 3 %, der Verbrauch von Erdgas alleingegenommen aber um 22 % erhöhen.

Im Rahmen dieses Szenarios ist für die Zeit bis 1995 mit einer – allerdings geringfügigen – Erhöhung der CO<sub>2</sub>-Emissionen zu rechnen

[23] Auf Grund eines Beschlusses der Kommission wurde das Öko-Institut Freiburg/Darmstadt beauftragt, nachträglich unabhängig von dem Studienkomplex „A-Gesamt“ eine Studie zu erstellen, die Mittel und Wege eines Ausstiegs der Bundesrepublik aus der Kernenergie bis zum Jahre 1995 untersucht. Der Bericht ging der Kommission am 21.08.1990 zu.

Diese Studie des Öko-Institutes verwirft offenbar den allen Studien des Komplexes „A-Gesamt“ übereinstimmend zugrunde liegenden Analyseraster, was schon deshalb erstaunlich ist, weil der Raster von eben diesem Institut ausgearbeitet und in den Verhandlungen mit den Koordinatoren der Studienkomplexe verbindlich durchgesetzt wurde. Die Ergebnisse dieser Studie sind aus diesem Grunde nicht kompatibel mit den im Team der Koordinatoren abgestimmten Ergebnissen aller ursprünglich in Auftrag gegebenen Studien. Da zudem – zumindest für den Nicht-Elektrizitätsbereich – keinerlei Angaben über die zugrundeliegenden Annahmen und den Rechengang gemacht werden, ist es nur möglich, die Ansätze und Ergebnisse unter dem Gesichtspunkt der Plausibilität zu beurteilen.

Für den Bereich der Elektrizitätswirtschaft ist das Öko-Szenario „Ausstieg 1995“ wie folgt gekennzeichnet:

- Durch Abstriche bei der für erforderlich gehaltenen Reserveleistung, wesentlich weitergehende Verlagerung der Revisionen der Kraftwerke in die Sommerzeit, Wieder-Inbetriebnahme aus Umweltgründen langfristig konservierter Kraftwerke und Reduktion der Lieferverpflichtungen ins Ausland wird erreicht, daß die Jahreshöchstlast auch nach Abschaltung aller Kernkraftwerke bis 1995 gedeckt werden kann. Dabei wird unterstellt, daß die Stromnachfrage bis dahin nicht ansteigt.

- bis 1995, d. h. praktisch innerhalb von fünf Jahren wird sich die in TWh gemessene Stromerzeugung nach Einsatzenergieen wie folgt ändern:

Steinkohle	+ 33 %
Braunkohle	– 21 %
Gas	+320 %
Öl	+870 %
Kernenergie	–100 %

Das Öko-Szenario enthält keinerlei Angaben über Maßnahmen, die für andere Energiebereiche vorzusehen sind.

Auf diesen Grundlagen errechnet das Öko-Institut folgende Reduktionen der CO<sub>2</sub>-Emission:

bis 1995 um 8 %  
bis 2005 um 35 %

Hierbei geht das Öko-Institut davon aus, daß – natürlich unter Mißachtung der für alle anderen Studien verbindlichen Regeln des gemeinsamen Analyserasters – bis 1995, also innerhalb von 5 Jahren, der Energieverbrauch insgesamt um 20 % und im Verkehr für sich genommen um 34 % verringert wird.

[24] In der Variante „Ausbau der Kernenergie“ wird in erster Linie vorgesehen, die Leistung der Kernkraftwerke zwischen 1987 und 2005 durch Zubau von zehn Blöcken (je 1300 MWe) von 23,6 auf 36,6 GWe zu erhöhen.

Im Rahmen dieses Szenarios ist mit den folgenden Reduktionen der CO<sub>2</sub>-Emissionen zu rechnen:

CO<sub>2</sub>-Emissionen in 1987 675 Mio. t  
CO<sub>2</sub>-Emissionen in 2005 495 Mio. t  
Verminderung um 221 Mio. t oder 31 %.

Würden entsprechend den beiden Reduktions-Szenarien auch alle Möglichkeiten einer Einsparung von Energie genutzt, dann ergäbe sich eine weit höhere Reduktion der CO<sub>2</sub>-Emissionen.

## 2.2.2 Die Entwicklung des Primärenergieverbrauchs und der Emissionen im Rahmen des Reduktions-Szenarios

[25] Im folgenden wird zunächst der Referenzfall, das Reduktions-Szenario „Energiepolitik“ unter Ein-schluß des „Hemmnisabbaus“ untersucht. Auf die anderen Szenarien wird später eingegangen werden.

[25a] Die nachstehende Tabelle gibt die Entwicklung des Primärenergieverbrauchs und der CO<sub>2</sub>-Emissionen aus Quellen im Bundesgebiet unter Verwendung der folgenden spezifischen CO<sub>2</sub>-Emissionsraten wider:

Steinkohle	91,7 kg/TJ Input oder 2,69 kg CO <sub>2</sub> /kg SKE
Braunkohle	111,1 kg/TJ Input oder 3,25 kg CO <sub>2</sub> /kg SKE
Rohöl	77,8 kg/TJ Input oder 2,28 kg CO <sub>2</sub> /kg SKE
Erdgas	55,6 kg/TJ Input oder 1,63 kg CO <sub>2</sub> /kg SKE

Im Mittel für alle fossilen Energieträger führt dies zu den folgenden spezifischen Emissionen:

1987	2,32 kg CO <sub>2</sub> /kg SKE
2005	2,19 kg CO <sub>2</sub> /kg SKE

Tabelle 4

**Primärenergieverbrauch und CO<sub>2</sub>-Emissionen nach Energieträgern**

	Petajoule		Mio. t SKE		Mio. t CO <sub>2</sub>		2005, 1987 = 100
	1987	2005	1987	2005	1987	2005	
Steinkohle .....	1 878	1 155	64,1	39,4 <sup>1)</sup>	173	106	61,5
Braunkohle .....	1 016	617	34,7	21,1 <sup>2)</sup>	113	69	60,7
feste Brennstoffe .....	2 894	1 772	98,8	60,5	286	175	—
Mineralöl .....	4 060	2 552	138,6	87,1	316	199	62,9
Gase .....	2 250	2 709	76,8	92,5	125	151	120,4
Kohlenwasserstoffe .....	6 310	5 261	215,4	176,9	441	350	—
fossile Brennstoffe .....	9 204	7 033	314,1	240,1	727	525	—
andere Primärenergien .....	1 535	2 005 <sup>4)</sup>	52,4	68,4	—	—	130,6
Insgesamt .....	10 739	9 038 <sup>4)</sup>	366,5	308,5	727 <sup>3)</sup>	535 <sup>3)</sup>	84,2

<sup>1)</sup> das koinzidiert mit dem Minderheitsvotum der Mikat-Kommission (35 bis 40 Mio. t SKE p. a.)

<sup>2)</sup> dies entspricht 74 Mio. t Rohbraunkohle

<sup>3)</sup> die Abweichungen zu den im abschließenden Studienbericht festgestellten CO<sub>2</sub>-Emissionen beruhen auf Differenzen in der Erfassung der Energieprozesse und der Emissionssätze

<sup>4)</sup> entsprechend der Urfassung des Berichts „A-Gesamt“

**2.2.3 Rationelle Energieverwendung**

Wie die Kommission wiederholt festgestellt hat, gehört rationellerer Energieverwendung Vorrang bei allen Maßnahmen zur Reduktion klimarelevanter Spurengase.

**2.2.3.1 Möglichkeiten einer Verminderung der CO<sub>2</sub>-Emissionen**

**[26]** Es gibt *fünf Wege* einer Verminderung der CO<sub>2</sub>-Emissionen. Gemeinsam ist diesen Wegen, daß auf CO<sub>2</sub>-intensive Prozesse entweder verzichtet wird oder daß diese Prozesse umgestellt werden auf CO<sub>2</sub>-schwache oder CO<sub>2</sub>-freie Prozesse. Die fünf Wege sind:

- 1) *Vermeiden*, das heißt ersatzloser Verzicht auf CO<sub>2</sub>-emittierende Prozesse (Energiesparen im engeren Sinne)
- 2) *Rationalisieren*, das heißt Verbesserung des Wirkungsgrades der Energiegewinnung, -umwandlung und -nutzung.
- 3) *Umstellen*, das heißt Ersetzung CO<sub>2</sub>-intensiver durch CO<sub>2</sub>-schwache Prozesse.
- 4) Substituieren durch erneuerbare Energien, vor allem Sonne einschließlich Biomasse, Wind und Erdwärme.
- 5) *Einsatz von Kernenergie*.

**2.2.3.2 Wege der rationellen Energieverwendung**

**[27]** Rationelle und sparsame Energienutzung ist aus vielen Gründen notwendig. Sie dient dem Ziel, die Energieversorgung langfristig sicherer, kostengünstiger und umweltschonender zu machen, insbesondere durch:

- rationale Gestaltung der Energiegewinnungs- und -umwandlungsprozesse;
- bessere Energienutzung, zum Beispiel durch Verminderung des spezifischen Energieverbrauchs mittels Wärmedämmung;
- Umstellung auf eine andere Energietechnik, die zu einem höheren Wirkungsgrad führt, zum Beispiel Kraft-Wärme-Kopplung oder Kombikraftwerke;
- Verzicht auf Energienutzung, zum Beispiel durch Verminderung der Raumtemperatur.

**2.2.3.3 Vorrang der rationellen Energieverwendung**

**[28]** Die in den letzten Jahren erzielten Erfolge beim Energiesparen sind beachtlich. Der Energieverbrauch je Einheit des Bruttosozialprodukts hat sich deutlich vermindert. In der Tat, derzeit kann bei etwa gleich hohem Primärenergieeinsatz ein um 30 Prozent höheres Sozialprodukt erwirtschaftet werden, als dies noch Mitte der 70-iger Jahre der Fall war.

Die folgenden Daten spiegeln diese Entwicklung wieder:

Tabelle 5

### Entkopplungsdaten

	Bruttoinlands- produkt zu Preisen von 1980	Primärenergie- verbrauch
1973 . . . . .	1 271,6 Mrd. DM	378,5 Mio. t SKE
1989 . . . . .	1 769,2 Mrd. DM	383,5 Mio. t SKE
1989, 1973 = 100 . . .	139,1	101,3
Entkopplung .	100,0 →	72,8

Diese Einsparerfolge wurden in erster Linie mit den in der Bundesrepublik ganz vorwiegend eingesetzten marktwirtschaftlichen Mitteln erreicht. Der internationale Vergleich zeigt, daß durch vorrangig regulierende Maßnahmen ein solches Einsparziel nicht verwirklicht werden konnte. Zurückhaltung bei Eingriffen in die Energiewirtschaft ist daher angezeigt.

[29] Die Enquete-Kommission hat wiederholt zum Ausdruck gebracht, rationellerer Erzeugung, Umwandlung und Nutzung von Energie – Energiesparen – sei nicht nur das zentrale Anliegen einer verantwortlichen Energiepolitik, es sei auch das geeignetste Mittel zur Reduktion der Emissionen klimaschädlicher Spurengase (vgl. den ersten Zwischenbericht, S. 47: „Energiesparen ist prioritär bei der Suche nach Wegen zur Senkung des Energieverbrauchs“).

[30] In dieser Perspektive peilt das „Reduktions-Szenario“ ein ehrgeiziges Ziel an:

Jeweils 1987 = 100 angesetzt steigt bis 2005 das reale Bruttoinlandsprodukt auf 153. In dieser gleichen Zeit sinkt der Primärenergieverbrauch auf 86. Die Entkopplung erreicht damit

$$100 \rightarrow 56.$$

Die entscheidende Frage ist, ob es mit vertretbaren Mitteln möglich sein wird, Energie in solchem Maße zu sparen. Immerhin liegt die für die Zeitspanne 1987 bis 2005 erwartete jahresdurchschnittliche Entkopplungsrate um etwa 60 Prozent über der Rate, die in der Zeitspanne 1973 bis 1989 realisiert wurde. Dabei ist auch zu berücksichtigen, daß bis Ende der 80iger Jahre die am meisten Erfolg versprechenden Möglichkeiten rationeller Energieeinsparung bereits ausgeschöpft wurden.

#### 2.2.3.4 Einsparungen durch energiebewußtes Verhalten

[31] Im zusammenfassenden Studienbericht wird festgestellt, daß auch energiebewußtes Verhalten zu Energieeinsparungen und zur Verminderung der CO<sub>2</sub>-Emissionen beiträgt. Als Beispiel werden genannt: eine Absenkung der Raumtemperatur, nicht zu

häufiges Duschen, freiwilliger Verzicht auf motorisierte Verkehrsleistungen usw.

Die hieraus resultierenden Verminderungen des Energieverbrauchs werden auf 4 bis 7 % veranschlagt.

Dieser zusätzliche Verminderungsbetrag bleibt aber bei der Synthese der Szenarienrechnung außer Ansatz.

Demgegenüber werden im Rahmen des Berichts der Kommission zum Vorgehen bei der Reduktion klimarelevanter Spurengase (Abschnitt E) sowohl die Energieeinsparung als auch die Emissionsminderung durch energiebewußtes Verhalten einheitlich mit 5 % angesetzt und in die Szenarienrechnung eingeführt. Das ergibt dann eine Gesamtreduktion von über 30 %.

Wir geben demgegenüber folgendes zu bedenken:

1. Nach allen Erfahrungen ist zweifelhaft, ob sich die Bevölkerung bereit finden wird, zusätzlich zu der von ihr abverlangten Reduktion des Energieverbrauchs auch noch freiwillig auf 5 % ihres Verbrauchs zu verzichten. Wir hätten es daher für richtiger gehalten, diese 5 % bei der Berechnung der Reduktion des Energieverbrauchs und der CO<sub>2</sub>-Emissionen außer Ansatz zu lassen.
2. Vollends zu bezweifeln ist aber, daß für alle Szenarien eine einheitliche Reduktion aufgrund energiebewußten Verhaltens von 5 % anzusetzen ist.

Bei diesem Vorgehen wird nämlich nicht berücksichtigt, daß die Szenarien unterschiedliche Anforderungen an die Rationalisierung des Energieverbrauchs stellen und infolgedessen auch unterschiedlich Raum bleibt für zusätzliche freiwillige Reduktion. Ganz deutlich ist das der Fall in den Ausstiegsszenarien in welchen zugegebenermaßen die Reduktionen die technischen Rationalisierungspotentiale weitgehend ausschöpfen.

Zur Erläuterung weisen wir darauf hin, daß nach dem Ausstiegsszenario 2005 der Endenergieverbrauch der privaten Haushalte um 54 % gesenkt werden soll. Wenn man den zusammenfassenden Bericht mit 90 bis 180 PJ veranschlagten Effekt einer Temperaturabsenkung im Wohnbereich hinzurechnet, ergäbe sich eine zusätzliche Verminderung um größenordnungsmäßig 6 bis 12 %, also um 54 zuzüglich 6 bis 12 % (dies entspricht in der Summe 60 bis 66 %). Dies übertrifft das technische Potential und ist deshalb wenig plausibel und noch weniger belegbar.

### 2.3 Aspekte einer kritischen Analyse

[32] Ziel einer kritischen Analyse des Reduktions-Szenarios muß sein, zu erkennen, ob diese Strategie von realistischen Grundannahmen ausgeht und ob – gegebenenfalls in welchem Ausmaße – die im Rahmen dieser Strategie vorgeschlagenen Maßnahmen im gegebenen oder zu erwartenden politisch-ökonomischen Kontext auch realisiert werden können.

Hier sind vor allem die folgenden Fragenkomplexe zu untersuchen:

1) Tragen die vorgeschlagenen Interventionen — das Instrumentarium — den bei allen Eingriffen in das wirtschaftliche Geschehen zu erwartenden Friktionen, insbesondere den Einbußen an privatwirtschaftlicher Initiative Rechnung und berücksichtigen sie die bei den Betroffenen ausgelösten Abwehr- und Vermeidungshandlungen?

siehe unter 2.4

2) Inwieweit genügen die vorgeschlagenen Maßnahmen dem Kriterium der Kostenoptimierung, d. h. der Forderung, die gebotene Reduktion der CO<sub>2</sub>-Emissionen mit geringstmöglichem Aufwand zu verwirklichen und wird dabei beachtet, daß die für solche Maßnahmen zur Verfügung stehenden Mittel — der Kapitalstock — begrenzt sind?

siehe unter 2.5

3) Wird ausreichend der Tatsache Rechnung getragen, daß die bundesdeutsche Wirtschaft am Weltmarkt teilnimmt und in die Europäische Gemeinschaft eingebunden ist?

siehe unter 2.6

4) Ist zu erwarten, daß die in Vorschlag gebrachten Erhöhungen der Preise für Energieträgern und energieintensive Erzeugnisse auch politisch auf den Weg gebracht und durchgesetzt werden können?

siehe unter 2.7

5) Ist es überhaupt noch sinnvoll, die Analyse der Lage und die empfohlenen Maßnahmen allein auf das bisherige Bundesgebiet abzustellen oder wäre es nicht allein richtig, mit Blick auf die Vereinigung der beiden Teile Deutschlands alle Erkenntnisse und Vorschläge auch auf das Territorium der DDR zu erstrecken und damit auf ein vereintes Deutschland zu beziehen?

siehe unter 3

6) Entspricht die in den Studien angesetzte Entwicklung der Bevölkerung des Bundesgebietes realen Erwartungen?

siehe unter 4.2

7) Müssen nicht gewachsene Energiestrukturen und daraus herzuleitende energiepolitische Handlungszwänge berücksichtigt werden?

siehe unter 4.3

8) Was ist in dem gegebenen politisch-ökonomischen Kontext von dem in Vorschlag gebrachten sektorspezifischen Maßnahmen zu erwarten?

siehe unter

4.8.7.: Grundsätze

5.3.1.: Umwandlungssektor (leitungsgebundene Energien)

5.5.2.: Raumwärme/Wärmedämmung

5.5.3.: Elektrogeräte usw.

5.4.5.: Mittelständische Unternehmen

5.4.5.: Organisationen ohne Erwerbscharakter

9) In welchem Ausmaß müssen die vielfältigen Besonderheiten des Verkehrs in Rechnung gestellt werden?

siehe unter 5.6

## 2.4 Instrumentarium — Friktionen — Vermeidungsstreben

### 2.4.1 Grundsätzliche Anmerkungen zu den Instrumenten

#### 2.4.1.1 Fragestellungen

[33] Die vorangestellte Frage lautet (s. unter 2.3):

Tragen die vorgeschlagenen Interventionen — das Instrumentarium — den bei allen Eingriffen in das wirtschaftliche Geschehen zu erwartenden Friktionen, insbesondere den Einbußen an privatwirtschaftlicher Initiative Rechnung und berücksichtigen sie die bei den Betroffenen ausgelösten Abwehr- und Vermeidungshandlungen?

Welche energie- und umweltpolitischen Instrumente zur Verringerung der CO<sub>2</sub>-Emissionen eingesetzt werden sollen, ist schwierig zu entscheiden. Im folgenden wird analysiert,

- welche Instrumente überhaupt in Betracht kommen,
- welchen Sachzwängen die verschiedenen Instrumente unterworfen sind, hier vor allem wie sich die Einbindung in die Europäische Gemeinschaft auswirkt.

#### 2.4.1.2 Zwei grundlegende Vorbemerkungen

[34] Die Politik verfügt über eine Vielzahl von Eingriffsmöglichkeiten, um energie- und umweltpolitische Ziele zu verwirklichen. Die Wahl der Mittel sollte nicht dogmatisch bestimmt werden, sondern sich nach deren Effizienz und Praktikabilität richten. Dies schließt den Auftrag ein, das geltende vielschichtige und teils widersprüchliche Systeme energiepolitischer Interventionen zu straffen. Weniger Bürokratie und mehr Transparenz sollten die Marktkräfte besser zur Wirkung bringen. Ziel sollte nicht ein Mehr an Eingriffen in das Geschehen auf den Energiemärkten sein, sondern weniger, dafür aber gezieltere Interventionen.

[35] Das Anliegen einer klimagerechten Reduktion der CO<sub>2</sub>-Emissionen ist so bedeutsam und seine Verwirklichung so schwierig, daß geboten ist, sämtliche Reduktionsmöglichkeiten auszuschöpfen, das heißt alle geeigneten Wege — Verzicht, Rationalisierung und Substitution — müssen beschritten werden. Die konkrete Verteilung der Lasten ist dann eine Frage der politischen Abwägung auf der Grundlage der zur Verfügung stehenden ökonomischen und ökologischen Daten.

### 2.4.1.3 Das Instrumentarium

[36] Energie- und umweltpolitische Maßnahmen können nur in Kenntnis der Handlungsmöglichkeiten beurteilt und gewertet werden. Deshalb wird nachstehend zunächst ein in den Studienberichten nicht enthaltener Überblick gegeben.

[37] Wir haben zwischen energiepolitischen und umweltpolitischen Eingriffen zu unterscheiden.

Die in erster Linie in Betracht zu ziehenden energiepolitischen Eingriffe sind nachstehend zusammengestellt. Hierzu rechnen auch die auf die gleichen Ziele gerichteten Eingriffe der leichten Hand, wie zum Beispiel die Vermittlung von Informationen, Empfehlungen an die Betroffenen usw. – siehe Kasten 1.

Vorrangige Instrumente *umweltpolitischer Interventionen sind spezifische Grenzwerte* – gegebenenfalls auch in der Form verbindlicher Selbstverpflichtungen – für Emissionen „klassischer“ Luftschadstoffe. Hierzu gehören SO<sub>2</sub>, NO<sub>x</sub>, CO, VOC und Staub. Solche Grenzwerte können gegebenenfalls für klimawirksame Spurengase, insbesondere für CO<sub>2</sub> und NH<sub>4</sub> eingeführt werden.

#### Kasten 1

##### Zusammenstellung energiepolitischer Eingriffsmöglichkeiten

1) Regelungen, die die *Mengen* CO<sub>2</sub>-intensiver Produkte und Prozesse *begrenzen*, bis hin zu Erzeugungs- und Verwendungsverboten. zu denken ist an

- Begrenzungen der Förderung oder des Einsatzes von Stein- und Braunkohle und (Zoll-)Kontingenten für Energieeinfuhren;
- Genehmigungspflichten oder -vorbehalte, Zulassungsbeschränkungen für die Errichtung oder den Betrieb umweltgefährdender Anlagen;
- Obergrenzen der Emissionen für einzelne Unternehmen oder Gebiete;

dies alles auch in der Form verbindlicher Selbstverpflichtungen.

2) (Marktkonforme) *Regelungen, die die Kosten oder die Preise beeinflussen*, insbesondere

- Subventionen, Beihilfen oder Steuerentlastungen einschließlich steuerlicher Förderungsmaßnahmen und Investitionshilfen gemäß § 7 d des Einkommensteuergesetzes.
- Steuern, etwa eine Energiesteuer, aber auch spezifische Verbrauchssteuern, Abgaben, etwa eine CO<sub>2</sub>-Abgabe, Zölle, Ausgleichssysteme (z. B. der Kohlepfennig) usw.

In der Praxis wird es zu einer Vielzahl von Kombinationen und Mischformen kommen.

### 2.4.1.4 Die Eingriffsebenen

[38] Die CO<sub>2</sub>-Emissionen können energiepolitisch auf zweierlei Art eingedämmt werden: durch *mengenwirksame (m)* und durch *preis- und kostenwirksame (p)* Maßnahmen. Bezogen auf die verschiedenen energiewirtschaftlichen Ebenen beziehungsweise energiewirtschaftlichen Bereiche sind vorrangig die folgenden Instrumente in Betracht zu ziehen (siehe Kasten 2).

#### Kasten 2

##### Übersicht über die wichtigen energiepolitischen Interventionen auf den verschiedenen Eingriffsebenen

- 1) Auf der Ebene der *Erzeugung von Primärenergie-Trägern*:
  - (m) Förderverbote oder -beschränkungen, Erzeugungsgebiete;
  - (p) Höchstpreise (Preisobergrenzen), Subventionen und Beihilfen, Steuerbefreiungen und -erleichterungen, Steuern und Abgaben.
- 2) Auf der Ebene der *Einfuhr von Primär- und Sekundärenergieträgern*:
  - (m) Einfuhrrestriktionen, Zollkontingente;
  - (p) Zölle, Einfuhrabgaben.
- 3) Auf der Ebene der *Umwandlung von Primärenergie in Endenergie*:
  - (m) Erzeugungsverbote, Mengenrestriktionen (Stromerzeugung), Gebote hinsichtlich der einzusetzenden Primärenergien (Verstromung von Steinkohle) usw.;
  - (p) Steuern und Abgaben, Ausgleichssysteme (Kohlepfennig).
- 4) Im Bereiche der *gewerblichen Energienutzung*:
  - (m) Ge- und Verbote, Mengenrestriktionen, Auflagen, insbes. Verwertungs-Gebote oder -Verbote;
  - (p) Subventionen und Beihilfen, Steuerbefreiungen und -erleichterungen, Steuern (Verbrauchssteuern) und Abgaben
- 5) Im Bereiche der *privaten Energienutzung*:
  - (m) Verbote, Mengenrestriktionen, Versorgungskonzepte, Auflagen, insbes. Wärmedämmungsvorschriften;
  - (p) Subventionen und Beihilfen, Steuerbefreiungen und -erleichterungen, Steuern (Verbrauchssteuern) und Abgaben
- 6) im Bereiche des *Verkehrs*:
  - (m) Zulassungs- und Verkehrsbeschränkungen, Auflagen insbes. in Form von Umweltschutzanforderungen, Geschwindigkeitsbegrenzungen usw.;
  - (p) Subventionen und Beihilfen, Steuerbefreiungen und -erleichterungen, Steuern (Verbrauchssteuern) und Abgaben



### 2.4.2 Mengenregelnde Eingriffe

[39] Die vorliegenden Studien fordern in zahlreichen Fällen, die Erzeugung oder Verwendung bestimmter Energien zu verringern. Es fehlen vielfach aber Vorschläge, mit welchen Mitteln und auf welchen Wegen diese Reduktionen erreicht werden sollen. Deshalb die folgenden Hinweise auf mögliche Maßnahmen zur Erreichung dieser Ziele.

[40] Mengenregelnde Eingriffe in den Energiemarkt beurteilen Ökonomen häufig als marktwidrig. Bei diesem Urteil wird zumeist übersehen, daß Maßnahmen zur Eindämmung der CO<sub>2</sub>-Emissionen tief greifen müssen, wenn sie erfolgreich sein sollen. Sie müssen bewirken, daß sich die Struktur des betroffenen Zweiges der Energiewirtschaft grundlegend anpaßt.

Hierbei ist auch zu beachten, daß in bereits bestehenden Anlagen, Aggregaten und auch Verkehrsmitteln der Anteil der Energiekosten an den gesamten Produktionskosten zumeist gering ist. Dies hat zur Folge, daß eine Steuer oder Abgabe mit dem Ziele einer Verwendungsbeschränkung oder eines Verwendungsverzichts recht hoch anzusetzen wäre.

[41] Zur ausreichenden Reduktion der CO<sub>2</sub>-Emissionen wird auf mengenregelnde Maßnahmen nicht verzichtet werden können, ja, solche Maßnahmen werden häufig an erster Stelle stehen müssen. Stets ist aber ein Ansprechpartner erforderlich, der die Mengenregelung dann auch vornimmt.

Eine solche Lage ist im Steinkohlen- und im Braunkohlenbergbau, in der Elektrizitätswirtschaft und – eingeschränkt – in der Gaswirtschaft gegeben. Günstigstenfalls reicht eine mehr oder minder formlose einvernehmliche Regelung aus. Zwei Hindernisse können aber gegeben sein: die vorgesehene Regelung könnte auf wettbewerbsrechtliche Bedenken stoßen oder sie könnte mit dem EG-Recht kollidieren. Andererseits bestehen nur begrenzte Möglichkeiten, auf der Ebene des Letztverbrauchs einschließlich des Verkehrs mengenregelnd einzugreifen.

### 2.4.3 Preis- und kostenbeeinflussende Maßnahmen (Steuern und Abgaben)

[42] Die vorliegende Zusammenfassung der Ergebnisse der Studienkomplexe A.1 bis A.6 enthält eine Vielzahl von zum Teil wenig reflektierten Vorschlägen für die Einführung oder Erhöhung von Steuern und Abgaben. Abgesehen von der bei den Handlungsempfehlungen kaum berücksichtigten Ausführungen im letzten Kapitel fehlen kritische Analysen der Zulässigkeit und der Realisierbarkeit der vorgeschlagenen Belastungen fast vollständig. Daher die folgenden grundsätzlichen Anmerkungen, denen in diesem hier vorgeschlagenen Programm nach Kräften Rechnung getragen wird.

[43] In vielen Fällen sehen die Studien vor, daß zur Reduktion der CO<sub>2</sub>-Emissionen Steuern oder Abgaben einzuführen sind. Diese Vorschläge werden durchweg mechanistisch begründet. Es heißt:

– eine durch eine solche Steuer oder Abgabe herbeigeführte Preiserhöhung hat zur Folge, daß sich

Einsparmaßnahmen oder Substitutionen nunmehr lohnen;

– als Nebeneffekt erbringen solche Steuern oder Abgaben Finanzmittel, die für die Finanzierung anderweitiger Maßnahmen zur Erhaltung und Verbesserung des Klimas verwendet werden können.

### 2.4.4 Friktionen – Vermeidungsstreben

[44] Daß sich durch eine dergestalt bewirkte Erhöhung der Preise für bestimmte Energien die Nachfrage nach diesen Energien verringert, wird in der Regel weder analysiert noch quantifiziert.

Dies gibt Anlaß zu den folgenden fünf Feststellungen:

[45] *Erstens:* eine Energiesteuer oder CO<sub>2</sub>-Abgabe, so wie sie in jüngster Zeit häufig vorgeschlagen wird, führt zu einer erheblichen Veränderung der volks- und energiewirtschaftlichen Grunddaten bis hin zu zusätzlichen Belastungen der Energieverbraucher in Beträgen von jährlich über 100 Mrd. DM. Das hat Konsequenzen für das Maß der Verwirklichung anderer wirtschaftspolitischer Ziele („trade offs“). Daher muß auch analysiert werden, welchen Platz Abgaben im Rahmen der Finanzplanung einnehmen werden und welche Auswirkungen auf die volkswirtschaftlichen Grunddaten – Wirtschaftswachstum, Preisentwicklung, außenwirtschaftliches Gleichgewicht usw. – zu erwarten sind. Hier sei auch darauf hingewiesen, daß die vorgeschlagenen Maßnahmen häufig zu Kapitalvernichtungen erheblichen Ausmaßes, zum Beispiel durch vorzeitige Stilllegungen, führen werden.

[46] *Zweitens:* Jeder Eingriff in das Marktgeschehen schränkt das freie Spiel der wirtschaftlichen Kräfte ein. Privatwirtschaftliche Initiativen werden gelähmt. Abwehrhaltungen und Vermeidungsaktionen können ausgelöst werden. Die im anderen Teil Deutschlands eingetretene Lage macht dies überdeutlich.

[47] *Drittens:* Energiesteuern oder entsprechende Abgaben treffen die Bevölkerung in ihrer Breite. Im Rahmen eines differenzierten Steuersystems sind sie daher wenig sozialverträglich. Es wäre indessen nicht angezeigt, Energieverbrauchern zunächst durch eine Steuer oder Abgabe erheblich zu belasten und sie dann durch spezifische Steuerbefreiungen oder -entlastungen wieder freizustellen.

[48] *Viertens:* Wir zweifeln nicht daran, daß jeder Bürger bereit ist, zu einer nachhaltigen Verbesserung der Umwelt beizutragen. Wir sollten indes nicht verkennen, daß die Verwirklichung dieses Ziels von jedem von uns Opfer fordert: Verzicht und Einschränkungen in der Lebenshaltung und in der Lebensgestaltung. Daher müssen wir uns bemühen, die den Bürger treffenden Lasten in Grenzen zu halten und zugleich die finanzielle Leistungsfähigkeit berücksichtigen. Wir sind für umweltschützende Maßnahmen, die auch den Rechten des Bürgers auf freie Entfaltung und Gestaltung seines Lebens Rechnung tra-

gen. Der Staat hat die erforderlichen Rahmenbedingungen zu schaffen.

[49] *Fünftens*: Prohibitive Energiepreise für energieintensive Fertigung bringen nichts, da solche Preise nur dazu führen, daß die so verhinderte Produktion anderswo stattfindet. Schon jetzt ist das Umweltschutzgefälle ein nicht zu vernachlässigender Standortfaktor.

## 2.5 Kosten der Reduktion der CO<sub>2</sub>-Emissionen – Kostenoptimierung – begrenzte Mittel

[50] Die Mehrzahl der Maßnahmen zur Reduktion klimawirksamer Spurengase belastet im Saldo die Volkswirtschaft, das heißt verursacht Netto-Kosten. Einige Maßnahmen sind im Saldo für die Volkswirtschaft positiv.

Weit davon entfernt, die volkswirtschaftlichen Kosten zur alleinigen Leitlinie der in Betracht gezogenen Maßnahmen zu machen, war die Kommission gleichwohl bestrebt, die Kosten kennen zu lernen. Wie der nunmehr vorliegende endgültige zusammenfassende Bericht über die Ergebnisse der Studienkomplexe A.1 bis A.6 freimütig bekennt, war es den Studiennehmern nicht möglich, die Kosten einigermaßen vollständig anzugeben. Zudem sind die Kostenangaben keineswegs konsistent. Als Auswahl- und Bewertungskriterium sind die Kosteninformationen daher nur recht eingeschränkt verwertbar.

[51] Zunächst und vorab mußte geklärt werden, auf welches Bezugsniveau, konkret welches Preisniveau die Kostenangaben abgestellt werden sollten und daß dieses Niveau für alle Maßnahmen gleichermaßen gelten soll. Besonderen Anlaß für die Bemühung war die Feststellung, daß in der ersten Version des Berichtes zum Studienkomplex A die Kostenangaben durchweg bezogen wurden auf das im Jahr 2005 in der Einspar-Variante erreichte Preisniveau, das sowohl die bis dahin durch die Ölpreisentwicklung bewirkten Preiserhöhungen als auch eine Steuer oder Abgabe in Höhe von 15 DM/GJ (440 DM/t SKE) auf Brennstoffe und Fernwärme und von 7 Pf/kWh auf Elektrizität einschließt.

In realen Rechnungen liegt dieses Preisniveau etwa 2½ mal so hoch wie das gegenwärtige Niveau (in dieser Rechnung sind die Strompreise nur mit dem Preis der verstromten Brennstoffe angesetzt). Kein Wunder, daß bezogen auf diese Meßplatte festgestellt wurde: „Praktisch alle vorgeschlagenen Energieeinsparinvestitionen sind rentabel“. (Endbericht A.1 vom 28.02.1990, S. 86).

[52] Mit der Entscheidung, die Kosten nunmehr auf die mittleren Energiepreise abzustellen, die „in dem jeweils betroffenen Sektor und der betroffenen Nutzungszeit“ (Endbericht „A-Gesamt“, S. 232) erreicht werden, wurde der vorbezeichneten Irreführung die Grundlage entzogen. Es bleibt nur noch die nicht zu vernachlässigende Tatsache, daß diese Bezugspreise nach Ölpreisen ausgerichtet sind, die – nach unserer Auffassung weit übersetzt – real um – bis 2005 ansteigend – 63 Prozent über den Ölpreisen von 1987 liegen.

[53] Die wesentlichen Kostenangaben für das Szenario „Energiepolitik“ (die zweite Stufe des Reduktions-Szenarios) sind die folgenden („A-Gesamt“, Abschnitt 4.1.2.3 ff.):

Tabelle 6

### Jährliche Nettokosten der Reduktionsmaßnahmen des Szenarios „Energiepolitik“ bezogen auf das jeweils ohne zusätzliche Steuern und Abgaben erreichte Preisniveau in Mio. DM

+ = Nettokosten

– = Nettokosten-Entlastung

<b>Rationelle Energieaufwendung</b>	
Raumwärme .....	+1 874
Elektrogeräte .....	–1 937
Kleinverbrauch .....	– 118
KWK, HKW, Fernwärme .....	– 420
Raffinerien .....	– 56
	– 657
<b>Erneuerbare</b>	
Thermische Kollektoren .....	+ 413
Regenerative Nahwärme .....	– 75
Wärmepumpen .....	+2 709
	+3 047
Substitution durch Erdgas .....	+ 500 *)
Höhere Auslastung von Kernkraftwerken .....	– 163
	+ 337
<b>Summe über alles .....</b>	<b>2 726</b>

\*) Basis: Importkohlepreis

[54] Aus dieser Übersicht läßt sich entnehmen

(1) Bei der im Energiepolitik-Szenario bis 2005 erreichten Energieeinsparung (real etwa 54 % über dem gegenwärtigen Preisniveau – Strompreise zu den Einstandspreisen der verstromten Energieträger gerechnet) ist rationelle Energieverwendung in den Bereichen Elektrogeräte, Kleinverbraucher, KWK, HKW, Fernwärme und Raffinerien, ferner regenerative Nahwärme und höhere Auslastung des bestehenden Kernkraftparks allemal lohnend.

(2) Von den vier Maßnahmenbündeln mit positiven Nettokosten bezogen auf das oben bezeichnete Preisniveau (Nettokosten insgesamt 5496 Mio. DM p.a.) entfallen auf

– die Reduktion des Energieeinsatzes für die Raumwärme	34,1 %
– Thermische Kollektoren	7,5 %
– Wärmepumpen	49,3 %
– Maßnahmen zur Substitution durch Erdgas	9,1 %
	100 %

[55] Dies sind die wesentlichen aus dem endgültigen Bericht „A-Gesamt“ für das Energiepolitik-Szenario

abzulesenden Erkenntnisse über die Kosten der Reduktion der CO<sub>2</sub>-Emissionen – zu wenig, um hieraus Leitlinien für ein strategisches Vorgehen ableiten zu können.

## 2.6 Internationaler Wettbewerb

**[56]** Die vorangestellte Frage lautet (s. unter 2.3.):

Wird ausreichend der Tatsache Rechnung getragen, daß die bundesdeutsche Wirtschaft am Welthandel teilnimmt und in die Europäische Gemeinschaft eingebunden ist?

Bei den Studien ist dieser doppelten Einbindung der deutschen Wirtschaft nicht oder nicht ausreichend Rechnung getragen worden. Deshalb die folgenden Hinweise.

### 2.6.1 Einbindung der deutschen Wirtschaft in den internationalen Handel

**[57]** Die deutsche Wirtschaft ist in den internationalen Güter- und Warenaustausch eingebunden, zumal innerhalb des Europäischen Binnenmarktes. Der Außenbeitrag zum Bruttosozialprodukt der Bundesrepublik übersteigt 25 Prozent. Dies heißt, die internationale Wettbewerbsfähigkeit der energieintensiven und exportorientierten Industriezweige darf nicht über Gebühr beeinträchtigt werden, soll verhindert werden, daß Absatzmärkte und Arbeitsplätze verloren gehen.

Konkret heißt dies: Maßnahmen zur Reduktion des Ausstoßes von CO<sub>2</sub> und anderen Spurengasen sollten die Kosten und Preise für Energieprodukte und energieintensive Erzeugnisse nicht ungerechtfertigt in einem Maße erhöhen, das die Exportfähigkeit in Frage stellt – übrigens recht häufig mit der Folge, daß nicht mehr aufrecht zu erhaltende energieintensive Produktionen in andere Länder abwandern und sich insoweit an den CO<sub>2</sub>-Emissionen insgesamt kaum etwas ändert.

### 2.6.2 Die Einbindung in die Europäische Gemeinschaft

**[58]** Auf dem Gebiet der Energiewirtschaft wird der Europäische Binnenmarkt schrittweise verwirklicht. Der deutschen Energie- und Umweltpolitik werden dadurch Rahmenbedingungen gesetzt. Dies heißt zweierlei:

- 1) Bislang der Bundesrepublik Deutschland zustehende grundlegende energie- und umweltpolitische Kompetenzen sind bereits auf die Europäische Gemeinschaft übergegangen oder werden schrittweise auf diese übergehen. Dort, wo dies einmal geschehen ist, werden wir nur noch im europäischen Rahmen handeln können.
- 2) Auch bei den nach wie vor zulässigen autonomen energie- und umweltpolitischen Maßnahmen muß berücksichtigt werden, daß sich unsere Volkswirtschaft im Wettbewerb auf dem Gemeinsamen Markt behaupten muß. Energie- und umweltpolitische Alleingänge sind nur noch begrenzt möglich.

**[59]** Durch die Einführung der einheitlichen Europäische Akte wirft der EG-Vertrag einige Rechtsfragen auf:

Nach dem Wortlaut der Römischen Verträge und ihrer Auslegung durch den Europäischen Gerichtshof ist es derzeit nicht möglich, klar auszusagen, wo die Befugnisse der Bundesrepublik enden, Maßnahmen zum Schutz des Klimas zu ergreifen. Die Einheitliche Europäische Akte hat der Europäischen Gemeinschaft weitgehende Umweltkompetenzen verschafft (vgl. Art. 100 a, 130 r-t). Diese Befugnisserweiterung hat aber die nationalen Umweltkompetenzen nicht in gleichem Ausmaße verringert. Einzelstaatliche Maßnahmen sind jedenfalls dann noch zulässig, wenn sie nicht gegen EG-Recht verstoßen.

Die bisherige Rechtsprechung erlaubt kein abschließendes Urteil darüber, inwieweit etwaige mengenmäßige dem Klimaschutz dienende Begrenzungen für den Import von Energieträgern noch in die Kompetenz der einzelnen Mitgliedstaaten fallen. Der Europäische Gerichtshof hat allerdings anerkannt, daß der Umweltschutz Grundlage für eine Beschränkung des innergemeinschaftlichen Warenverkehrs sein kann. Dabei ist auch zu bedenken, daß sich die Entwicklung des Klimas nicht als Problem eines einzelnen Mitgliedstaates darstellt, sondern eine gemeinsame Herausforderung ist. Erst die weitere Entwicklung der Rechtsprechung durch den Europäischen Gerichtshof wird Aufschluß darüber geben können, ob und in welchem Maße die Bundesrepublik noch befugt ist, auf nationaler Ebene außenwirtschaftlich wirksame energiebezogene Maßnahmen zum Schutz des Klimas zu treffen.

Die derzeitigen rechtlichen Unsicherheiten betreffen auch die Frage, ob unter den gegebenen energiewirtschaftlichen Bedingungen auf dem Gemeinsamen Markt ein Mitgliedstaat Sonderabgaben im Energiebereich zum Schutz des Klimas einführen kann. Ungeachtet der Tatsache, daß nach geltendem Recht die Steuer- und Abgabenhöhe bei den Mitgliedstaaten liegt, sind solche Abgaben aber auf keinen Fall zulässig, wenn sie zu einer diskriminierenden Beschränkung des Handels zwischen den Mitgliedstaaten führen kann.

Die Mitgliedstaaten haben allerdings bei der Annahme der Einheitlichen Europäischen Akte zum Ausdruck gebracht, daß „die einzelstaatliche Politik der Nutzung der Energieressourcen“ nicht auf die EG übertragen werden sollte. Die Kompetenzregelungen sowohl im EGKS-Vertrag als auch im Euratom-Vertrag bleiben aber bestehen. Insoweit bedarf jede einzelstaatliche Regelung einer näheren Prüfung auf ihr Vereinbarkeit mit den EG-Verträgen.

**[60]** Hier stehen insbesondere mengenmäßige Einfuhrbeschränkungen für Öl und Gas, Förderbeschränkungen für heimische Stein- und Braunkohle und eine an der Quelle erhobene Steuer oder Abgabe auf den Energieverbrauch oder die CO<sub>2</sub>-Emissionen zur Debatte. Allen diesen Vorhaben ist gemeinsam, daß, wenn sie klimawirksam sein sollen, sie sehr tief eingreifen müssen, was zur Folge hätte, daß das Funktionieren des Gemeinsamen Marktes deutlich in Mitleidenschaft gezogen würde.

In voller Anerkennung der oben aufgezeigten rechtlichen Problematik sind wir daher der Meinung, daß die

Bundesrepublik möglicherweise befugt sein würde, die genannten Maßnahmen autonom zu ergreifen, die Regeln des Gemeinsamen Marktes aber sogleich Grenzen für solche Maßnahmen setzen würden. Für deutlich klimawirksame Maßnahmen auf nationaler Ebene wäre ohne eine Abstimmung im europäischen Rahmen kaum Raum.

Die nachstehenden Ausführungen werden unter den hier bezeichneten Rahmenbedingungen gemacht.

**[61]** Soweit, wie beim Gemeinsamen Zolltarif, die Befugnis zu einer Regelung oder Maßnahme unzweideutig von der Bundesrepublik auf die Europäische Gemeinschaft übergegangen ist, besteht kein Zweifel an der Zuständigkeit. Anders ist dies dann, wenn die Bundesrepublik grundsätzlich die Befugnis zu Regelungen und Maßnahmen behalten hat, diese Regelungen und Maßnahmen aber das Funktionieren des Gemeinsamen Marktes berühren. In diesen Fällen kann eine Regelung oder Maßnahme allenfalls so weit gehen, wie dies noch vereinbar ist mit den Grundregeln für das Funktionieren des Gemeinsamen Marktes, insbesondere mit den Grundsätzen des freien Warenverkehrs und der Wettbewerbsordnung des EWG-Vertrages.

**[62]** Die unterzeichnenden Mitglieder dieses Votums sind hinsichtlich der Frage, ob und inwieweit einzelstaatliche Vorschriften über finanzielle Instrumente zum Schutz des Klimas mit dem EWG-Recht vereinbar sind zu keiner abschließenden Auffassung gelangt.

Die Einbindung der Bundesrepublik in die Europäische Gemeinschaft führt auf dem Energie- und Umwelt-Gebiet zudem dazu, daß sich unserer Energiewirtschaft ohne wesentlichen Schutz im Gemeinsamen Markt behaupten muß und die Abnehmer sich gleichermaßen mit Energie aus anderen Mitgliedstaaten werden versorgen können.

In diesem Kontext werden ohnehin nur noch begrenzt zulässige nationale Maßnahmen zur Reduktion der CO<sub>2</sub>-Emissionen aus bundesdeutschen Quellen nur greifen, wenn sie sich in den Europäischen Binnenmarkt sinnvoll einordnen.

**[63]** Die nachstehende These wird nicht von allen Mitgliedern vertreten.

Unter dem in Textziffer 62 genannten Vorbehalt können die energiepolitischen Zuständigkeiten und Wirkungsmöglichkeiten zwischen der EG und den nationalen Instanzen wie folgt abgegrenzt werden (Kasten 3):

### Kasten 3

#### Abgrenzung zwischen EG- und nationalen Zuständigkeiten und Wirkungsmöglichkeiten

##### **(A): Nur noch gemeinschaftlich regelbar:**

Eingriffe jeder Art – mengenwirksame, wie auch preis- und kostenwirksame – in die *Einfuhr von Primär- und Sekundärenergie*, z. B.

Einfuhrrestriktionen, Zollkontingente, Zölle und Einfuhrabgaben

Preis- und kostenwirksame Eingriffe in die *Erzeugung von Primärenergie*

z. B. Höchstpreise, Subventionen und Beihilfen, Steuerbefreiungen und -erleichterungen, Sondersteuern und -abgaben.

Preis- und kostenwirksame Eingriffe in die *Umwandlung von Primärenergie in Endenergie*

z. B. Steuern und Abgaben (z. B. Ausgleichssysteme, etwa die Einführung eines neuen Kohlepfennigs).

##### **(B): Nationale (autonom) regelbar unter Beachtung der durch den Gemeinsamen Markt (Europäischer Binnenmarkt) gesetzten Grenzen (begrenzte Aktionsradien):**

Mengenwirksame Eingriffe in die *Erzeugung von Primärenergie* z. B.

Förderverbote oder -beschränkungen, Erzeugungsge- und -verbote

Mengenwirksame Eingriffe in die *Umwandlung von Primärenergie in Endenergie*, z. B.

Erzeugungsverbote (z. B. zum Kernenregieeinsatz), Mengenrestriktionen (z. B. für die Stromer-

zeugung), Ge- und Verbote Primärenergien einzusetzen (z. B. zur Verstromung von Steinkohle)

Eingriffe jeder Art in die *gewerbliche Energienutzung*, z. B.

Ge- und Verbote, Mengenrestriktionen, Auflagen, (etwa Verwertungs-Gebote oder -verbote); Subventionen und Beihilfen, Steuerbefreiungen und -erleichterungen, Sondersteuern (Verbrauchssteuern) und -abgaben.

Preis- und kostenwirksame Eingriffe in die *Verkehrsstruktur*, z. B.

Subventionen und Beihilfen, Steuerbefreiungen und -erleichterungen, Sondersteuern (Verbrauchssteuern) und -abgaben.

##### **(C): nach wie vor uneingeschränkt national (autonom) regelbar:**

Eingriffe jeder Art in die *private Eigennutzung*, z. B.

Verbote, Mengenrestriktionen, Auflagen, z. B. zur Wärmedämmung; Subventionen und Beihilfen, Steuerbefreiungen und -erleichterungen, Sondersteuern (Verbrauchssteuern) und -abgaben.

Mengenwirksame Eingriffe in die *Verkehrsstruktur*, z. B.

Zulassungs- und Verkehrsbeschränkungen, Auflagen hinsichtlich Umweltschutzanforderungen, Geschwindigkeitsbegrenzungen usw.

Daraus folgt konkret:

In einem die übrigen Mitgliedstaaten berührenden Ausmaß werden wir auf den Gebieten der Energieeinfuhr, der Erzeugung heimischer Energie und der Energieumwandlung autonom

- weder mengenregulierende Maßnahmen einführen können; dies widerspräche dem Grundsatz des freien Warenverkehrs;
- noch die Kosten und Preise durch Subventionen oder Sonderabgabe ent- oder belasten können; dadurch würde der Wettbewerb im Gemeinsamen Markt beeinträchtigt werden.

[64] In allen vorgenannten Fällen wären wir veranlaßt, im Rahmen der Europäischen Gemeinschaft oder im Einvernehmen mit den übrigen Mitgliedstaaten einen Weg zu suchen und zu finden. Wir sollten uns dabei aber bewußt sein: letztlich können wir Energieimporte aus anderen Mitgliedstaaten nur abwehren, wenn wir heimische Energien zu wettbewerbsfähigen Preisen anbieten.

[65] Unter Beachtung des Diskriminierungsverbots, konkret ohne Benachteiligung von Anbietern aus anderen Mitgliedstaaten, wäre es andererseits nach wie vor möglich, den privaten Energie-(End-)Verbrauch mengenmäßig oder preislich zu regeln, da solche Maßnahmen sich nicht auf das Funktionieren des Gemeinsamen Energiemarktes auswirken würden.

### 2.6.3 Eine CO<sub>2</sub>- oder Energie-Abgabe oder -Steuer im Kontext der EG

[66] Aus wirtschaftlicher Sicht kann eine wesentliche Belastung der Energieträger entsprechend den CO<sub>2</sub>-Emissionen oder entsprechend ihrem Verbrauch nur EG-weit in Erwägung gezogen werden. Zudem muß sich ihre Höhe in wirtschaftlich und sozial verträglichen Grenzen halten. Ein nationaler Alleingang würde die Wettbewerbsrelationen auf dem Gemeinsamen Markt grundlegend verzerren und verbietet sich daher. Empfehlungen der Kommission müßten daher unter dem Vorbehalt des Erreichens einer EG-weiten Regelung ausgesprochen werden.

[67] Wegen der Einbindung der Energiewirtschaft in den Gemeinsamen Markt sind in einer Vielzahl von Fällen kosten- und preiswirksame Regelungen – auch eine nationale Energiesteuer oder CO<sub>2</sub>-Abgabe – entweder unzulässig oder zur Verwirklichung eines vorgegebenen Umweltziels unzureichend, da die Bedingungen des Gemeinsamen Marktes nur moderate Hebesätze zulassen.

[68] Die Studien unterstellen, daß die Energienutzung in der EG nachhaltig *steuerlich belastet* werden wird. Es zeigt sich nun aber, daß die *EG-Kommission* derzeit eine Politik verfolgt, die erst ab 2000 zu einer Stabilisierung und erst ab 2010 zu einer Senkung der CO<sub>2</sub>-Emissionen führen wird. In der derzeitigen Orientierung ist auszuschließen, daß es EG-seitig zu einer steuerlichen Belastung der Energienutzung zu dem bislang erwarteten Zeitpunkt und in dem bislang

erwarteten Ausmaß kommen wird. Die Bundesregierung wird aufgefordert, auf eine Änderung der Haltung der EG zue diesem Punkt hinzuwirken.

[69] In Ziffer (59) ihrer Mitteilung vom 29. 11.1989 „Energie und Umwelt“ an den Ministerrat nimmt die EG-Kommission auch zu der Frage Stellung, ob unter der Zielsetzung der Umweltvorsorge nicht geboten sei, eine umfassende Energiesteuer oder eine CO<sub>2</sub>-Abgabe in der Gemeinschaft einzuführen. Ziffer (59) stellt fest:

„... Langfristig gesehen kann die Einführung neuer Steuern, wie der öffentlich diskutierten CO<sub>2</sub>-Abgabe und die Umgestaltung existierender Steuern, beispielsweise zur Begünstigung von Investitionen zur Steigerung der Energieeffizienz, im Rahmen der gemeinsamen Verwirklichung von energie- und umweltpolitischen Zielen nicht ausgeschlossen werden. Die Analyse der möglichen Einführung einer CO<sub>2</sub>-Abgabe muß jedoch im Rahmen einer langfristigen Perspektive und in einem weitumspannenden globalen Kontext, der über die Grenzen der Europäischen Gemeinschaft hinausgeht, vorgenommen werden. Das Thema antizyklischer Steuern wäre von besonderer Bedeutung, da sie Energieeffizienzsteigerungen in Zeiten niedriger Energiepreise unterstützen und die Steuerlast in Zeiten hoher Energiepreise verringern. Steuern jeder Art müssen natürlich mit der Einheitlichen Europäischen Akte konform sein und insbesondere dem Bedarf nach neuen Grenzkontrollen entgegenwirken.“

Aus dieser Feststellung ist zu entnehmen, daß die EG-Kommission die Einführung solcher Steuern und Abgaben nur auf längere Sicht und in einem weltweiten Kontext in Erwägung zieht, und dies auch nur in Übereinstimmung mit der Einheitlichen Europäischen Akte. Unerläßliche Voraussetzung für die Einführung einer solchen Steuer wäre eine qualifizierte Mehrheit im Ministerrat.

A fortiori ausgeschlossen wäre nach dieser Feststellung eine autonome nationale Energiesteuer oder CO<sub>2</sub>-Abgabe mit verzerrender oder verfälschender Wirkung auf den Wettbewerb im Gemeinsamen Markt. Auf keinen Fall dürfen zwischen den Mitgliedstaaten der EG Binnenzölle oder außertarifäre Handelschranken wieder- oder neu eingeführt werden.

## 2.7 Preise

### 2.7.1 Ölpreisentwicklung

[70] Die vorangestellte Frage lautet:

Ist zu erwarten, daß die in Vorschlag gebrachten Erhöhungen der Preise für Energieträger und energieintensive Erzeugnisse auch politisch auf den Weg gebracht und durchgesetzt werden können?

[71] Alle Prognosen, die eine deutliche Steigerung der Ölpreise voraussagen, stammen aus der Zeit, bevor der Treibhauseffekt ernst genommen wurde oder aber sie negieren diesen Effekt. Dies kommt auch in dem den Studienkomplexen A.1 bis A.6 zugrundege-

legten Gemeinsamen Analyseraster (Bericht „A-Gesamt“, Abschnitt 3.1.2) zum Ausdruck. In diesem Raster wird für alle Studienteilnehmer verbindlich festgestellt: die realen Ölimportpreise werden sich in der Zeit zwischen 1987 und 2000 um 17 Prozent und in der Zeit zwischen 1987 und 2010 um 95 Prozent erhöhen. Noch wesentlich stärker sind die angesetzten Erhöhungen der realen Ölpreise bis zur Mitte des nächsten Jahrhunderts.

[72] Ein säkularer Rückgang der Nachfrage nach fossilen Energieträgern um 50 Prozent – entgegen der von der Weltenergiekonferenz für die Zeit bis 2060 prognostizierten Erhöhung dieser Nachfrage auf mehr als das Doppelte – entzieht allen bis dahin vorausgesagten Ölpreissteigerungen die Grundlage.

Dabei ist zu bedenken: Die Grenzkosten (technischen Förderkosten) der Ölförderung liegen im Nahen Osten zwischen 1 und 5 US-Dollar je Barrel. Die Förderkapazität der OPEC wird derzeit nur zu 55 bis 60 Prozent ausgelastet. Entweder nehmen wir den Treibhauseffekt ernst. Dann müssen wir real nicht steigende Ölpreise akzeptieren. Oder wir glauben nicht daran. Dann sollten wir auch nichts zur Reduktion der CO<sub>2</sub>-Emissionen unternehmen. Deutliche Steigerungen der realen Ölpreise und wirksame Maßnahmen gegen den Treibhauseffekt sind nicht miteinander zu vereinbaren, weil die Verringerung des Verbrauchs fossiler Brennstoffe im Zuge einer Politik der Reduktion der CO<sub>2</sub>-Emissionen die Energiepreise drücken wird. Daher sollte mit real konstanten Ölpreisen gerechnet werden.

[73] Hingewiesen sei auch auf den folgenden Sachverhalt: Die Rohölimporte in die Bundesrepublik erreichten im Spitzenjahr (1981) einen Wert von 49 Mrd. DM (letztlich etwa 14 Mrd. DM = 0,7 % des BSP), um dann bald darauf zurückzugehen. Das waren damals 3 % des BSP, mit denen die Volkswirtschaft belastet wurde. Die Folgen der zweiten Ölkrise für die wirtschaftliche Entwicklung – ein Konjunkturreinbruch mit einer kumulierten Wachstumseinbuße von über 10 % des BSP und politisch brisante Preiserhöhungen – sind bekannt.

[74] Der hier vertretenen Auffassung tritt der nunmehr vorliegende zusammenfassende Bericht A.1 bis A.6 mit der Erwägung entgegen (S. 21), eine durch Rückgang der Nachfrage nach Rohöl ausgelöste Verminderung der Exporterlöse der Ölförderländer könnte dadurch aufgefangen werden, daß die Ölabbnehmerländer den Öllieferländern einen „kompensatorischen Preisaufschlag für den Mengenrückgang“ einräumen.

Wir glauben aus zwei Gründen nicht an eine solche Lösung:

- Bei real konstanten, also nicht steigenden Ölpreisen wird die finanzielle Lage der Ölförderländer auch im Falle eines klimaerhaltungsbedingten Rückgangs der Ölexporte noch ungleich günstiger sein als die der Entwicklungsländer, die auf den Export anderer Rohstoffe angewiesen sind.
- Jahrzehntelange Erfahrung lehrt, daß Rohstoffabkommen zur Stabilisierung der Preise allenfalls vorübergehend Bestand haben. Das letzte augenfällige Beispiel war das Welt-Zinnabkommen.

[75] Aus den vorbezeichneten Gründen sind wir der Auffassung, daß es nicht zu der im Bericht „A-Gesamt“ (Abschnitt 3.1.2) bezeichneten deutlichen Erhöhung der Rohölpreise und in deren Gefolge zu Erhöhungen auch der den Verarbeitern und Letztverbrauchern berechneten Preise für Energieprodukte kommen wird. Damit steht ein realer Mehrerlös von etwa 33 Mrd. DM p.a. in Frage. Dieser Mehrerlös errechnet sich unter Zugrundelegung der Energiestruktur von 1987.

Hierbei gehen wir davon aus, daß das Ausbleiben der angesetzten Erhöhungen der Weltmarktpreise für Rohöl und der Fortfall der hierdurch ausgelösten Steigerungen für Energieprodukte nicht zur Einführung kompensierender Energiesteuern oder -abgaben Anlaß gibt. Der vorliegende Bericht „A-Gesamt“ spricht sich hierzu nicht eindeutig aus. Wir stellen dies aber als unsere Auffassung fest.

Damit ändern sich sowohl die Errechnungsgrundlagen in den Szenarien für die erwarteten Verringerungen der CO<sub>2</sub>-Emissionen als auch die Grundlagen für die Kostenschätzungen.

[76] Die jüngsten Ereignisse am Persischen Golf geben Anlaß zu der Frage, ob die von uns vertretene These zur Ölpreisentwicklung aufrechterhalten werden kann. Wir bejahen dies: Entweder wird es im gegenwärtigen Konflikt zu einer Einigung kommen. Dann steht in Zukunft wieder ein ausreichendes Förderpotential zur Verfügung. Oder aber, die Auseinandersetzungen werden langfristig fortauern und eskalieren. Dann werden auch allen bisher angestellten Überlegungen zur Klimastabilisierung und Klimaverbesserung überdacht werden müssen.

## 2.7.2 Akzeptanz und politische Durchsetzbarkeit von Preissteigerungen

[77] Die Vielzahl und das jeweilige Ausmaß der Empfehlungen in den Szenarien zur Einführung von Steuern oder Abgaben mit Auswirkungen auf die Energiepreise sollte veranlassen zu überlegen, ob zukünftige deutsche Regierungen auch in der Lage und gewillt sein werden, politische Entscheidungen zu treffen, die die energieverbrauchenden Bürger in dem hier in Aussicht genommenen Maße belasten. Die gegenwärtigen Auseinandersetzungen über die Preise in der DDR geben diesem Problem aktuellen Bezug.

## 3. Ausdehnung auf das Gebiet der DDR – Politik zum Schutz der Erdatmosphäre in einem vereinten Deutschland

### 3.1 Notwendigkeit einer Einbeziehung der DDR

[1] Es ist wenig sinnvoll, in einer Zeit, in der die Vereinigung der beiden Teile Deutschlands vor der Tür steht, eine Politik zur Reduktion der Emissionen klimarelevanter Spurengase zu formulieren, die sich auf das Bundesgebiet beschränkt und die DDR außen vor läßt.

Bestimmend für die Forderung nach einer Erstreckung ist aber auch die folgende Erkenntnis: Eine für Zwecke des Umweltschutzes vergebene Aufwands-summe zur Reduktion der Emissionen klimawirksamer Spurengase kann in Anlagen der DDR mit niedrigerem Umweltschutzniveau effizienter angelegt werden als in Anlagen der Bundesrepublik Deutschland, für welche der vergleichbare zusätzliche Umweltnutzen ungleich geringer ist.

### 3.2 Status der Energieversorgung und der Umweltbelastung im Gebiet der DDR

#### 3.2.1 Status der Energieversorgung in der DDR

[2] Der dem noch amtierenden DDR-Ministerium für Umwelt, Naturschutz, Reaktorsicherheit und Energie

unterstellte Industriezweig „Energie und Brennstoff-industrie“ umfaßt 24 inzwischen in andere Rechtsformen überführten Kombinate mit etwa 200 000 Beschäftigten, das sind etwa 7 Prozent der insgesamt in der Industrie Beschäftigten. An den gesamtwirtschaftlichen Investitionen hat dieser Industriezweig einen hohen Anteil: zwischen 25 und 30 Prozent, verglichen mit den weniger als 10 Prozent in der Bundesrepublik Deutschland. Dieser Energiezweig erwirtschaftete allerdings nur einen Betrag von 10 Prozent vom Netto-produkt.

[3] Seit der ersten Ölkrise hat sich die Steigerung des Primärenergieverbrauchs (PEV) in der DDR deutlich und stärker als in der Bundesrepublik Deutschland abgekoppelt vom Wirtschaftswachstum, d. h. der Entwicklung des Bruttoinlandproduktes bzw. des produzierten Nationaleinkommens (beides als BSP bezeichnet). Die folgende Tabelle macht dies deutlich:

Tabelle 1

Die „Entkopplung“ in der DDR und der Bundesrepublik

	PEV in Mio. t SKE	BSP in Mrd. M, DM	PEV/BSP in t SKE/Mio. M, DM	Entkopplung 1973 = 100
DDR 1973 .....	106	137	773	100
DDR 1988 .....	124	268	463	60
Bundesrepublik Deutschland 1973 .....	379	1 272	298	100
Bundesrepublik Deutschland 1988 .....	390	1 691	231	77

[4] Diese Aussage wird durch zwei Feststellungen relativiert:

- 1) Die zur Verfügung stehenden statistischen Daten aus der DDR sind unzuverlässig. Sie sind unvollständig und keineswegs voll vergleichbar mit den entsprechenden Daten aus der Bundesrepublik Deutschland. Dies führt zu begrenzten Unstimmigkeiten in fast allen statistischen Aussagen dieses Kapitels. Im vorliegenden Falle ist zu vermuten, daß die Daten „geschönt“ sind. Schon wegen der grundlegenden Verschiedenheit der Wirtschaftsordnungen ist ein Vergleich zwischen den Volkswirtschaftsrechnungen der beiden deutschen Staaten in besonderem Maße problematisch.
- 2) 1973 hatte die DDR einen außerordentlich großen PEV/BSP, der 2.6mal so hoch lag wie in der Bundesrepublik Deutschland. Bis 1988 hat sich diese Relation verbessert, der PEV/BSP der DDR liegt aber immer noch doppelt so hoch wie in der Bundesrepublik. Auch bei Beachtung der oben bezeichneten Vorbehalte gegen statistische Vergleiche bleibt diese Aussage in ihrer Grundtendenz richtig.

[5] Die Versorgung der DDR mit Primärenergie im Jahr 1988 stellt sich wie folgt dar:

Tabelle 2

### Die Energieversorgung der DDR im Jahre 1988

1988	heimische Erzeugung Mio. t SKE	Verbrauch Mio. t SKE	Anteil am Primärenergieverbrauch	BRD 1989 P-Energieverbrauch *)
Braunkohle .....	92,1	85,5	68,9 %	8,5 %
Steinkohle .....	—	4,8	3,8 %	19,2 %
Mineralöl .....	0,05	17,0	13,7 %	40,3 %
Erdgas .....	4,6	12,4	10,0 %	16,9 %
Primärstrom .....	3,9	4,5	3,6 %	15,1 %
(dav. nuklear) .....	(3,9)	(3,9)	(3,1 %)	(12,5 %)
	100,7	124,2	100,0 %	100,0 %

\*) 1989: 384 Mio. t SKE

[6] In den beiden Teilen Deutschlands gliedert sich der Primärenergieverbrauch die drei großen Verbraucherguppen wie folgt auf:

Tabelle 3

### Anteile der Hauptverbrauchergruppen am Energieverbrauch

	DDR (1987)	Bundesrepublik Deutschland (1988)
Industrie einschließlich Energiewirtschaft ...	54,7 %	50,6 %
übrige Wirtschaft .....	26,7 %	24,7 %
Haushalte und Kleinverbraucher .....	18,6 %	24,7 %
	100 %	100 %

Zu dieser, auf einer groben Abschätzung beruhenden Gegenüberstellung ist zu beachten, daß in der DDR der im Vergleich nicht gezählte Eigenverbrauch des Energiesektors einschließlich der Netzverluste (6,5 %) mit 25 % der Brutto-Stromerzeugung ungleich höher liegt als in der Bundesrepublik Deutschland mit 15 % (3,8 % Netzverluste).

[7] Im Jahre 1986 wurde der wichtigste Primärenergieträger, die Braunkohle (310 Mio. t) wie folgt verwendet:

71,5 % zur Erzeugung von Strom und \*Fernwärme (in der DDR kommt der \*Fernwärme große Bedeutung zu, rund 20 % des Wohnungsbestandes werden mit \*Fernwärme beheizt);

18,0 % zur Wärmeerzeugung für Haushalte und Industrie;

8,5 % zur Veredelung;

2,0 % zum Export.

[8] Die von der Braunkohle dominierte Energieversorgung der DDR ist außerordentlich ineffizient. Nach Feststellungen der UNO liegt die DDR im Energieverbrauch pro Kopf an dritter Stelle hinter den USA und Kanada (UN, 1987, Energy Statistics Yearbook). 1987 galt folgende Rangordnung:

Tabelle 4

### Primärenergieverbrauch je Einwohner

Kanada .....	9 915 kg SKE je Einwohner
USA .....	9 542 kg SKE je Einwohner
DDR .....	7 891 kg SKE je Einwohner
Bundesrepublik Deutschland ....	5 624 kg SKE je Einwohner



### 3.2.2 Versorgung mit Strom und Fernwärme im besonderen

[9] Die Struktur der Stromerzeugung und -versorgung der DDR im Jahre 1988 zeigt die folgende Übersicht:

Tabelle 5

#### Die Elektrizitätsversorgung der DDR und der Bundesrepublik

1988	DDR		BRD zum Vergleich	
	TWh	v. H.	TWh	v. H.
Braunkohle .....	100,6	85,0	80,1	18,6
Steinkohle .....	0,2	0,2	130,7	30,3
Heizöl .....	0,6	0,5	11,1	2,6
Erdgas .....	—	—	29,3	6,8
Wasserkraft .....	1,7	1,4	20,7	4,8
Kernenergie .....	11,7	9,9	145,1	33,6
sonstige .....	3,5 **)	3,0	14,2	3,3
<b>Stromerzeugung *)</b> .....	<b>118,3</b>	<b>100,0</b>	<b>431,2</b>	<b>100,0</b>
Einfuhr .....	5,8	—	22,7	—
Ausfuhr .....	4,1	—	22,3	—
<b>Stromverbrauch *)</b> .....	<b>120,0</b>	<b>—</b>	<b>431,6</b>	<b>—</b>

\*) brutto

\*\*\*) vorwiegend Erdgas

In der DDR liegt der (Brutto-) Stromverbrauch je Einwohner in Höhe von 7450 kWh um 7 % über dem in der Bundesrepublik Deutschland (6990 kWh).

[10] Ein wichtiges Kennzeichen der Kraftwirtschaft der DDR ist die starke *Auskopplung von Wärme*, die — ohne die reinen Heizwerke — an der Wärmeversorgung der Haushalte einen Anteil von etwa 10 % erreicht (Bundesrepublik: 2,5 %). Die vorliegenden Statistiken geben keine eindeutige Antwort auf die Frage, welche Mengen an Fernwärme in Heizkraftwerken und Blockkraftwerken auf Grundlage von Rohbraunkohle, Braunkohlebriketts und anderen fossilen Energieträgern erzeugt werden. Auch ist die Abgrenzung zwischen Heizkraftwerken für die Nah- und die Fernwärmeversorgung und Zentralheizungsanlagen nicht deutlich zu erkennen. Nicht nachvollziehbare und daher unsichere Rückrechnungen führen zu dem Ergebnis, daß der sich ergebende Gesamtwirkungsgrad von Elektrizität + Fernwärme bei 57 %

liegt (vgl. R. Görgen und J. Wohlberg, Energieaufkommen und Energieverwendung in der DDR, et 1990, S. 115).

### 3.2.3 Umweltbelastung, Reduktion der CO<sub>2</sub>-Emissionen

[11] Die Umweltbelastung der DDR im Vergleich zur Bundesrepublik Deutschland ist aus Tabelle 6 abzulesen. Die Zahlen sprechen für sich.

Bezogen auf die wirtschaftliche Leistung — das Bruttoinlandsprodukt (DDR: 17 100 DM je Einwohner, Bundesrepublik Deutschland: 34 200 DM je Einwohner) — sind die Unterschiede in der energiewirtschaftlichen Effizienz und der energieinduzierten Umweltbelastung zwischen der Bundesrepublik Deutschland und der DDR noch ungleich größer: etwa doppelt so hoch.

Tabelle 6

**Energiewirtschaftliche Kenndaten und Umweltbelastungen im Vergleich**

Vergleich von Energie- und Umwelt-Kenndaten

Angaben pro Kopf und Jahr

(DDR: 16,1 Mio. Einw.; Bundesrepublik Deutschland: 62 Mio. Einwohner)

	Bundesrepublik Deutschland	DDR	Bundesrepublik Deutschland = 100
Primärenergieverbrauch t .....	6,3	8,2	130
Stromverbrauch in kWh .....	6 450	7 350	114
Brennstoffverbrauch der Braunkohlekraftwerke g SKE/kWh .....	320	350–450	112,5–140
SO <sub>2</sub> -Ausstoß kg .....	30	310	1 020
NO <sub>x</sub> -Ausstoß kg .....	43	59	137
CO <sub>2</sub> -Emission t .....	11,7	23,0 *)	196

\*) Eine neue Berechnung von R. Görgen und J. Wohlberg (et, 1990, S. 115) gelangt für 1987 zu einer Gesamtemission von 410 Mio. t p. a. Dies entspricht 25,5 t/cap und führt zu einer Relation von 100 : 218.

**3.3 Ausrichtung einer Politik der Reduktion der CO<sub>2</sub>-Emissionen im Gebiet der DDR****3.3.1 Warum eine Erstreckung auf den anderen Teil Deutschlands?**

**[12]** Die Volkswirtschaft verfügt nur über begrenzte Ressourcen zur Finanzierung von Investitionen zur Verbesserung der Umwelt. Es sollte bedacht werden, daß die Verwirklichung der Währungs-, Wirtschafts- und Sozialunion beider Teile Deutschlands erhebliche finanzielle Mittel beanspruchen wird. Deshalb könnten die für die Umwelt benötigten Mittel knapp werden. Dabei ist auch zu bedenken, daß es durchweg sinnvoller ist, eine für Zwecke des Umweltschutzes vorgesehene Aufwandssumme vorrangig in Anlagen der DDR mit vergleichsweise niedriger Umwelteffizienz anzulegen, als in Anlagen der Bundesrepublik, für welche der zusätzliche Nutzen für die Umwelt ungleich geringer ist.

**3.3.2 Fragestellung**

**[13]** Die Erstreckung einer Politik der Reduktion der Emissionen klimarelevanter Spurengase auf das Gebiet der DDR führt zu drei Fragen:

- 1) Welches sind die Perspektiven der Entwicklung der Energiewirtschaft und der Umweltbelastung in der DDR unter „Status-quo-Bedingungen“?
- 2) Wie sähe ein Szenario für das Gebiet der DDR aus, das analog zu dem Vorgehen im Bundesgebiet zu einer politisch vertretbaren Reduktion der Emissionen klimarelevanter Spurengase führt?

- 3) Welche Aktionen sind erforderlich, um das vorstehende Szenario zu verwirklichen?

**3.3.3 Realisierungsrahmen**

**[14]** Die gebotene Umgestaltung der Energiewirtschaft der DDR kann nur im Rahmen und nach Maßgabe der unerläßlichen und deshalb auch beabsichtigten fundamentalen Wirtschaftsreform in diesem Teil Deutschlands vor sich gehen. Dazu gehört nicht nur eine Währungsunion sondern auch eine grundlegende Änderung des Preissystems (vgl. Tabelle 6a) mit drei vorrangigen Zielen: Subventionen erübrigen (vgl. Tabelle 7), Wettbewerb ermöglichen und Anreize zur Leistungssteigerung und Rationalisierung schaffen. Diese Umstellung wird mehrere Jahre benötigen.

**[15]** Die einige Zeit umstrittene Frage nach den Rechtsgrundlagen für Maßnahmen in der DDR zur Reduktion der Emissionen klimarelevanter Spurengase ist praktische beantwortet. Der inzwischen verabschiedete Staatsvertrag vom 18.05.1990 über die Schaffung einer Währungs-, Wirtschafts- und Sozialunion sieht vor, daß in den hier relevanten Bereichen das bundesdeutsche Recht auch in der DDR nunmehr gilt oder gelten wird.

**3.3.4 Besondere Charakteristiken der Energiewirtschaft der DDR**

**[16]** Im Bereiche der Energiewirtschaft werden diese Änderungen deshalb schwer wiegen, weil es erforderlich sein wird, „Errungenschaften“ des realen existierenden Sozialismus abzulösen durch eine Sicherung und Verbesserung der sozialen Belange im Rahmen einer marktwirtschaftlichen Ordnung.

[17] Hierzu der folgende Hinweis:

Tabelle 7

### Vergleich der Energiepreise 1988 in Mark/DM

	Einheit	DDR	Bundesrepublik Deutschland	DDR, Bundesrepublik Deutschland = 100
Braunkohlenbriketts				
bewirtschaftet .....	50 kg	1,70	18,00	9,4
frei verkäuflich .....	50 kg	3,51	18,00	19,5
Elektrizität				
Haushalt .....	1 kWh	0,08	0,24	33,3
Industrie .....	1 kWh	0,18 *)	0,15	120
Stadtgas .....	1 m <sup>3</sup>	0,16	0,82	20
Normalbenzin .....	1 Liter	1,65	0,91	181
Dieselmotorkraftstoff .....	1 Liter	1,40	0,88	159

\*) Nach anderen Berechnungen etwa 16 Pfg./kWh

Quelle: Axel D. Neu, Zum strukturellen Wandel des Energiesektors in der DDR, Die Weltwirtschaft, 1990, Heft 1

Tabelle 8

### Subventionen in der DDR

Grobe Gesamtschätzungen und Durchschnittswerte

Subventionierung des Verbrauchs von Energie und Wasser in privaten Haushalten .....	8,0 Mrd. Mark p.a.
Subventionen für Braunkohlenbriketts .....	1,4 Mrd. Mark p.a.
Summe der Subventionen für die von den privaten Haushalten genutzte „Elektroenergie“ .....	2,0 Mrd. Mark p.a.
Subventionen an das Verbundnetz (altes Kombinat KVE) .....	0,6 Mrd. Mark p.a.
Subventionen für Fernwärme und Warmwasser .....	3,1 Mrd. Mark p.a.
Der Energiewirtschaft insgesamt zugute kommende Subventionen (50 % der Industriesubventionen insgesamt bzw. 15 % der Gesamtsumme der Preissubventionen) .....	20 Mrd. Mark p.a.
Subvention je Wohnung ohne Fernwärmeversorgung ...	100 Mark monatl.
Subvention je Wohnung mit Fernwärmeversorgung ...	200 Mark monatl.

[18] In der DDR gab es bislang keinen systematischen und umfassenden Umweltschutz. Während die Bundesrepublik Deutschland für Luftreinhaltung, Gewässerschutz, Abfallbeseitigung und Lärminderung im Jahr 1988 etwa 35 Mrd. DM aus öffentlichen und privaten Mitteln ausgab, erreichten die entsprechenden Ausgaben der DDR nur 1,6 Mrd. DM, d.i. pro Kopf der Bevölkerung somit nur 17 % des Betrags für die Bundesrepublik Deutschland.

[19] Das außerordentliche Defizit der DDR im Umweltschutz mag auch darauf zurückzuführen sein, daß in der DDR das Verursacherprinzip nicht gilt sondern das Nutzerprinzip, nach welchem derjenige, der saubere Luft oder sauberes Wasser nutzen will, selbst für die Reinigung sorgen muß.

#### 3.3.5 „Status-quo-Entwicklung“ der Energieversorgung in der DDR

[20] In den folgenden Abschnitten wird der Versuch einer Skizzierung der „Status-quo-Entwicklung“ unternommen.

Hier kann aber schon eine erste Antwort auf die Frage gegeben werden, wie weit es möglich wäre, die CO<sub>2</sub>-Emissionen im Gebiet der DDR zu verringern: die am 07. Juni 1990 in Bonn vom Minister für Umwelt, Naturschutz, Energie und Reaktorsicherheit der DDR, Prof. Dr. Karl-Hermann Steinberg, gegebene Auskunft, die DDR werde mittelfristig ihren Primärenergieverbrauch um 1,5 bis 2,0 % p.a. verringern. Über die 15 Jahre bis 2005 ergibt dies eine Reduktion, die zwischen 20 und 25 % liegt.

Rechnet man nun hinzu, daß dieser Verbrauchsrückgang verbunden sein wird mit einer schrittweisen Verringerung des Anteils der CO<sub>2</sub>-intensiven Braunkohle und zugleich mit größeren Zuwächsen bei den Erneuerbaren und möglicherweise auch bei der Kernenergie, dann kann die erreichbare Reduktion der CO<sub>2</sub>-Emissionen gut und gerne veranschlagt werden auf 25 bis 30 %, ohne daß zur Erreichung einer so starken Reduktion besondere Anstrengungen unternommen werden.

### 3.3.6 Szenario einer Politik der Reduktion der CO<sub>2</sub>-Emissionen im Gebiet der DDR

[21] Wie weit im Gebiet der DDR eine konsequente Politik der Verringerung der CO<sub>2</sub>-Emissionen Erfolg haben wird, läßt sich nur schwer abschätzen. Werden die Erkenntnisse der für das Bundesgebiet durchgeführten Studien auf den anderen Teil Deutschland übertragen, dann kann erwartet werden, daß es möglich sein müßte, die vom Gebiet der DDR ausgehenden CO<sub>2</sub>-Emissionen bis zum Jahr 2005 um über 30 % zu verringern. Diese These wird in den folgenden Abschnitten analysiert werden.

### 3.3.7 Aktionsfelder einer Politik der Reduktion der CO<sub>2</sub>-Emissionen

[22] Die Energiewirtschaft der DDR ist außerordentlich ineffizient. Das spezifische Energie-, Einspar- und Umstellungs-Potential der DDR übersteigt das der Bundesrepublik Deutschland um ein Vielfaches.

Für eine effizienzsteigernde Umstrukturierung der DDR-Energiewirtschaft stehen die folgenden Wege zur Wahl:

- Rationalisierung der Energienutzung
- Substitution der Braunkohle durch effizientere und schadstoffgünstigere fossile Brennstoffe
- ein Einsatz von „Erneuerbaren“
- ein Ausbau der Kernenergie
- Maßnahmen im Bereiche des Verkehrs.

[23] Soweit heute absehbar, ist die Rationalisierung der Energieerzeugung, -umwandlung und – Nutzung die wichtigste Aktion zur Steigerung der energiewirtschaftlichen Effizienz und zur Verringerung der Schadstoff- und CO<sub>2</sub>-Emissionen.

### 3.3.8 Zusätzliche Aktionsmöglichkeiten im Rahmen einer Politik der Reduktion der CO<sub>2</sub>-Emissionen im Gebiet der DDR

[24] Die singuläre Lage der Energiewirtschaft auf dem Gebiet der DDR bringt es mit sich, daß auch zwei besondere, für das Bundesgebiet nicht in Betracht zu ziehende Aktionen zu einer Reduktion der CO<sub>2</sub>-Emissionen beitragen können:

- Energiezulieferungen aus dem Bundesgebiet.
- eine Liberalisierung der Einfuhren

[25] Anders als in der Bundesrepublik Deutschland kann in der DDR eine – ohnehin im Rahmen der EG – fällige Liberalisierung der Energieeinfuhren wesentlich, und übrigens auch kostengünstig, zur Verringerung des Energieverbrauchs und der Schadstoff- und CO<sub>2</sub>-Emissionen beitragen. Zu denken ist vor allem an Erdgasabzüge aus der UdSSR, die gegen harte Währung möglich sein werden.

## 3.4 Möglichkeiten einer Reduktion der CO<sub>2</sub>-Emissionen im Bereiche der Primärenergieerzeugung

### 3.4.1 Die Braunkohleförderung (s. Tabelle 9)

[26] Rund 20 Mrd. t Braunkohlenvorräte in den beiden inzwischen in andere Rechtsformen überführten Braunkohlekombinaten Bitterfeld (Bezirk Halle) und Senftenberg (Bezirk Cottbus) sind zu wirtschaftlichen Bedingungen abbaubar. Das gegenwärtige Förderniveau könnte somit noch etwa 60 Jahre aufrechterhalten werden, allerdings unter außerordentlich schwierigen und immer schwieriger werdenden ökonomischen Bedingungen und ökologischen Belastungen.

Tabelle 9

Umrechnungstabelle für Braunkohle aus dem Mitteldeutschen Revier

	Gigajoule	t SKE	t BK <sup>1)</sup>	t CO <sub>2</sub>
1 GJ .....	–	34,12	114,5 · 10 <sup>-3</sup>	91,78 · 10 <sup>-3</sup>
1 t SKE .....	29.308	–	3,33–3,57	2,69
1 t BK <sup>1)</sup> .....	8,206–8,792	0,280–0,300 <sup>2)</sup>	–	0,897–0,961 <sup>3)</sup>
1 t CO <sub>2</sub> .....	10,40	91,7	1,041–1,114	–

1) Rohbraunkohle

2) DDR-Braunkohle wird mit unterschiedlichen Koeffizienten zwischen 0,28 und 0,30 in Tonnen Steinkohle-Einheiten umgerechnet. 0,28 Entsprechung dem Koeffizienten für die Rheinische Braunkohle. Entscheidend ist indessen nicht das SKE-Äquivalent, sondern der hohe Schwefelgehalt (bis 4 %) und Salzgehalt.

3) 1 t SKE in Form von Rohbraunkohle verursacht 3,25 t CO<sub>2</sub>-Emissionen.

[27] Einige Kennzahlen je Tonne Förderung für das mitteldeutsche Braunkohlenrevier — das rheinische Revier jeweils mit 100 angesetzt:

— Anzahl der Tagebaue	325
— Mitarbeiterzahl	224
— jährliche Flächen-Inanspruchnahme	360

Mit einem Anteil zwischen 50 und 60 % liegt der Wassergehalt der mitteldeutschen Braunkohle recht hoch. Ihr Transport beansprucht etwa ein Drittel der Güterbeförderungskapazität der Deutschen Reichsbahn.

Besonders hingewiesen sei auf die ansteigenden Mengen an Abraum von mittlerweile bis zu sechs Tonnen je Tonne geförderte Braunkohle, auf die geringen Flözstärken und die überalterten Förderanlagen.

[28] Praktisch beschränkt sich der Emissionsschutz im Braunkohlenbergbau der DDR auf Einrichtungen zur Staubabscheidung und auf hohe Schornsteine. Vorsorgen zur Zurückhaltung von Schwefeldioxid und Stickoxiden sind unbekannt.

[29] Aus den vorbezeichneten Gründen, wie auch aus Gründen des Umweltschutzes ist die Braunkohlenförderung gar nicht erst auf das für 1990 vorgesehene Planziel von 335 Mio. t angehoben worden, sondern verharrt weiterhin bei 310 Mio. t jährlich (etwa dreimal so viel wie in der Bundesrepublik Deutschland: 103,1 Mio. t p.a.). Es ist geplant, die Braunkohlenförderung der DDR bis 1998 auf eine ökologisch vertretbare Jahreskapazität von 160 bis 180 Mio. t zurückzufahren.

[30] Der *Braunkohlenbergbau* der DDR ist ebenso wie die darauf basierende *Stromerzeugung* (bisheriges Kombinat Braunkohlekraftwerke in Peitz) hochgradig sanierungsbedürftig mit dem Ziel einer Bereinigung der Abbaufelder, einer Steigerung der Wirkungsgrade der Stromerzeugung und einer Verringerung der Schadstoff- und CO<sub>2</sub>-Emissionen.

### 3.4.2 Steinkohleeinfuhren und -verwendung

[31] Die in der DDR dominierende Braunkohle ist der Brennstoff mit der höchsten spezifischen Schadstoff- und CO<sub>2</sub>-Emission. Jeder Ersatz der Braunkohle durch andere Brennstoffe vermindert die Emissionen, zumal dann, wenn gleichzeitig der Wirkungsgrad verbessert wird.

[32] Wegen der Probleme, die mit einer weiteren Steigerung der Braunkohlenförderung verbunden sind, ist die DDR an höheren *Steinkohleeinfuhren* interessiert. Sie stößt dabei aber auf Schwierigkeiten. Zusätzliche Importe aus den traditionellen Lieferländern — Polen, CSFR und UdSSR — sind sicherlich möglich, seitdem mit harter Währung bezahlt werden kann. Diese Länder benötigen ihre Kohle aber weitgehend selbst. Die DDR ist damit auf den Weltmarkt verwiesen. Dies spricht für küstennahe Verwendungen.

Wegen der Kosten besteht wenig Aussicht auf Bezüge von Steinkohle aus der Bundesrepublik. Die DDR

lehnt aus naheliegenden Gründen ab, sich an der Subventionierung der westdeutschen Steinkohle zu beteiligen.

[33] Bislang betrug der Steinkohlenverbrauch für die Wärmeerzeugung aus Kraft- und Heizwerken jährlich lediglich 2 bis 3 Mio. t. Für die reine Stromerzeugung spielte Steinkohle praktisch keine Rolle.

Mit Blick auf den sich abzeichnenden Elektrizitätsnotstand in der DDR planen die PreussenElektra und andere westdeutsche EVU einerseits und Rechtsnachfolger der DDR-Energiekombinate andererseits den Bau von zwei Heizkraftwerken von jeweils 500 MWe auf Basis von Einfuhrkohle. Diese Kraftwerke sollen in Rostock und — mit Richtbetrieb in die DDR — in Lübeck errichtet werden. Die Wärme wird zur Fernwärmeversorgung dieser beiden Städte ausgekoppelt.

### 3.4.3 Mineralöl

[34] Die *Ölversorgung* der DDR wird bestimmt durch zwei Besonderheiten:

- die quasi-totale Abhängigkeit von Rohöllieferungen aus der UdSSR (19 von insgesamt 21 Mio. t in 1987).

Wegen der Vorratslage wird die UdSSR ihre Lieferungen auf mittlere und lange Sicht erheblich einzuschränken gezwungen sein. Weitere Lieferländer waren der Iran, Irak, Libyen und Syrien.

- die Verarbeitung sowohl in der auf Zufuhren aus der UdSSR über die Pipeline „Freundschaft“ ausgerichteten Raffinerie in Schwedt an der Oder (bislang VEB Petrochemisches Kombinat (Schwedt) als auch in den auf Versorgung aus veredelter Braunkohle ausgerichteten Raffinerien in Leuna (bislang VEB Hydrierwerke „Walter Ulbricht“ in Leuna) und Zeitz (bislang VEB Hydrierwerk Zeitz).

Da die Erzeugung in diesen Raffinerien größer ist als der Inlandsbedarf, wurden ca. 4 Mio. t Mineralölprodukte exportiert — davon allein ca. 3 Mio. t nach West-Berlin.

### 3.4.4 Gas

[35] Der Anteil des *Gases* an der Versorgung der DDR mit Primärenergie (9%) ist vor allem aus zwei Gründen so gering:

- Die heimische Erdgasförderung in der Altmark bei Salzwedel der inzwischen in eine andere Rechtsform überführten VEB Erdgasförderung „Karl Marx“ (sichere Reserve: 45 Mrd. m<sup>3</sup>) ist seit 1985 leicht rückläufig und erreichte zuletzt 4 Mrd. m<sup>3</sup> p.a. Die gleiche Menge erreichte die mit hoher Umweltbelastung verbundenen Produktion von „Stadtgas“ aus der Verkokung von Braunkohle im Gaskombinat „Schwarze Pumpe“. Beiden Gasarten muß jedoch zwecks Qualitätsverbesserung Importerdgas beigemischt werden (20 % Stadtgas).

– Erdgasimporte aus der Sowjetunion (7 Mrd. m<sup>3</sup> p.a.) waren und sind sehr erschwert, weil das Lieferland den Gegenwart in Sachleistungen insbesondere auch durch Gestellung von Arbeitskolonnen beim Ausbau der Erdgasgewinnung in Sibirien und der Gasfernleitung von dort aus verlangt. Der Gasbezug erfolgt über eine Abzweigung von der Hauptleitung zwischen den sowjetischen Feldern und der Übernahmestelle an der Grenze der CSFR und der Bundesrepublik Deutschland.

[36] Langfristig ist eine Steigerung des Versorgungsanteils des Gases an der Energieversorgung der DDR – von derzeit 12 Mrd. m<sup>3</sup> auf 21 Mrd. m<sup>3</sup> p.a. bis 1995 – und damit auch eine deutliche Verringerung der Emissionen zu erwarten, denn die Währungsunion wird die DDR in den Stand setzen, die Bezüge aus der UdSSR in harter Währung zu bezahlen.

Geplant ist eine Verstärkung der Importe bis zum Jahr 2000 von 8 auf 20 Mrd. m<sup>3</sup> p.a. (Zusätzlich etwa 4 Mrd. m<sup>3</sup> aus der UdSSR und etwa 8 Mrd. m<sup>3</sup> aus Westeuropa.) Zu dieser Lieferung soll westliches Know-how zur Verbesserung der Fördertechnik beitragen.

Im Zuge dieser Umstellung wird es auch zu einer leistungsmäßigen Anbindung der DDR an die Gasfernversorgung der Bundesrepublik Deutschland und damit auch zu einem Zugang von Erdgas aus Feldern in der Bundesrepublik Deutschland und im übrigen Westeuropa kommen.

[37] Kooperation zwischen Unternehmen der westdeutschen Gaswirtschaft und der VNG (vormals „Schwarze Pumpe“) sind inzwischen vertraglich vereinbart. Im Vordergrund stehen folgende Vorhaben:

- Die Verbindung der beiden Erdgasleitungssysteme;
- Erdgaslieferungen aus Westeuropa (Bundesrepublik Deutschland, voraussichtlich auch die Niederlande und Norwegen usw.) in die DDR. Jährliche Bezüge in Höhe von 3 Mrd. m<sup>3</sup> über eine Zeitspanne von 15 Jahren sind schon ab Winter 1992 vorgesehen.

### 3.4.5 Erneuerbare

[38] Wie im Bundesgebiet sollte die vermehrte Verwendung erneuerbarer Energien auch in der DDR in Betracht gezogen werden. Nach den für viele Befürworter dieser Energie enttäuschenden Ergebnissen

der der Enquete-Kommission „Vorsorge zum Schutz der Erdatmosphäre“ nunmehr vorliegenden umfassenden Studien ist aber kaum zu erwarten, daß diese Energie in den nächsten 15 bis 20 Jahren einen nennenswerten Beitrag zur Versorgung dieses Teiles Deutschlands leisten wird, dies vor allem auch deshalb, weil sie in Bezug auf die Umweltvorteile im Gebiet der DDR konkurrieren muß mit vielen dort weitaus lohnenderen Maßnahmen zur Verminderung der Schadstoff- und CO<sub>2</sub>-Emissionen.

[39] Wasserkraft war mit etwa 0,5 Mio. t SKE an der inländischen Energiegewinnung beteiligt. Der Hauptanteil wird von dem im Erzgebirge installierten größten Pumpspeicherwerk Markersbach (Kapazität 1050 MW) erzeugt. In Betracht gezogen wird der Bau eines weiteren Pumpspeicherwerks Goldisthal in Thüringen. Einem weiteren beträchtlichen Ausbau der Wasserkraft stehen die ungünstigen natürlichen Bedingungen, wie unzureichende Niederschlagsmengen und schwache Gefälle der Flüsse entgegen.

[40] Die Nutzung von Erdwärme in Neubrandenburg könnte mit einer potentiellen Einsparung von 1 Mio. t Braunkohle bis zum Jahr 2000 verbunden sein.

Der Einsatz von Windkraftanlagen wird dadurch erschwert, daß es nur wenige Gebiete mit Windgeschwindigkeiten um 10 m/s gibt.

Vereinzelt werden Sonnenkollektoren, vor allem zur Erzeugung von Warmwasser weniger für Heizungen eingesetzt.

[41] Der Einsatz von Biogas, vornehmlich aus organische Abfällen, Mülldeponien und Abwasserbehandlung, könnte begrenzte Bedeutung erlangen.

## 3.5 Möglichkeiten einer Reduktion der CO<sub>2</sub>-Emissionen im Bereiche der Energieumwandlung

### 3.5.1 Mineralölverarbeitung

[42] Der Verbrauch an Mineralölprodukten erreichte in der DDR (1988) 17 Mio. t (1,1 t/cap), die zu vergleichen sind mit einem Verbrauch in der Bundesrepublik Deutschland (1988) von 106 Mio. t (1,7 t/cap). Im gleichen Jahr 1988 setzten die bundesdeutschen Raffinerien 84 Mio. t (1,3 t/cap) durch. Die Zusammensetzung nach Hauptprodukten ist deutlich verschiedenen (grobe Schätzungen wegen eingeschränkter Vergleichbarkeit):

Tabelle 10

### Aufgliederung des Mineralölverbrauchs

	DDR (1987)	Bundesrepublik Deutschland (1988)	
	Verbrauch	Erzeugung	Verbrauch
Benzin .....	28 %	30,0 %	34,6 %
Diesel .....	40 %	14,6 %	15,4 %
Heizöl .....	22 %	37,2 %	41,7 %
sonstige Produkte .....	10 %	18,2 %	8,3 %
	100 %	100 %	100 %

Auffällig ist der in der DDR deutlich höhere Dieselan- teil. Der Anteil des Benzins ist niedriger und mehr noch, der Anteil des Heizöls. Im wesentlichen ist dies die Folge der systematischen Zurückdrängung des leichten Heizöls aus der Wärmeversorgung der priva- ten Haushalte wegen der aus der Ölpreisexlosion Anfang der achtziger Jahre resultierenden Devisen- probleme. Zwischen 1979 und 1987 wurde der Heiz- ölverbrauch in der DDR um 61 % reduziert.

**[43]** Eines der vorrangigen Ziele der Umstellungen der Mineralölwirtschaft der DDR sollte sein, den Mi- neralölmarkt auf den Stufen der Verarbeitung und des Vertriebs dem Westen zu öffnen \*). Dabei ist aber zu beachten, daß die von der DDR gegenüber den übrigen RGW-Ländern eingegangenen langfristigen Be- zugs- und Abnahmeverpflichtungen eingehalten werden müssen. Die Mineralölversorgung von West-Ber- lin beruht fast ausschließlich auf Zulieferungen in Kesselwagenzügen aus der Raffinerie in Schwedt an der Oder. Diese Produkte entsprechend den Quali- tätsstandards der Bundesrepublik Deutschland.

**[44]** Zwei Perspektiven zeigen sich auf:

- Die Öffnung der deutsch-deutschen Grenze für die bislang durch ein Vier-Mächte-Abkommen und Interzonenvereinbarungen untersagte Zufuhr von Rohöl und Mineralölprodukten auf der Elbe.
- Der Bau einer auf Versorgung mit Rohöl auf dem Seewege ausgerichteten Raffinerie in Rostock.

Vorrangig ist zudem der Ausbau und die Modernisie- rung des in jeder Hinsicht rückständigen, übrigens durchweg nicht auf bleifreies Benzin eingerichteten Tankstellennetzes. Flächendeckend ist dies allerdings frühestens bis 1993 möglich.

### 3.5.2 Elektrizitäts- und Fernwärmeerzeugung

**[45]** Die erforderliche Anpassung des mitteldeut- schen Braunkohlenbergbaus an die im Rahmen einer Vereinigung der beiden Deutschland gegebenen neuen Bedingungen dürfte die wohl wichtigste und folgenreichste energie- und umweltpolitische Auf- gabe der Zukunft sein. Drei Wege stehen zur Wahl: sanieren, erneuern oder stilllegen.

**[46]** Eine Sanierung ist allenfalls bei 50 % der in Be- trieb befindlichen Braunkohlekraftwerke technisch machbar und wirtschaftlich sinnvoll. In erster Linie wird die Einführung der folgenden Techniken in Be- tracht zu ziehen sein:

- Befeuerungs- und Kesseltechniken,
- Leistungsregelungen,
- Rauchgasreinigungen.

Die Ausrüstung der DDR-Kraftwerke mit Entstau- bungs- und Entschwefelungsanlagen wird nach Schätzung des Umweltministers Steinberg 10 bis 12 Mrd. DM, der völlige Ersatz von rund 4 GW der der- zeitigen Kapazität 15 Mrd. DM und der Ausbau der Stromnetze 7 bis 10 Mrd. DM kosten.

\*) Bisher hatte der VEB Kombinat Minol in Berlin das Vertriebs- monopol inne.

Die installierte Kraftwerksleistung, welche überwie- gend von Braunkohle-Kraftwerken erbracht wird, wurde zwischen 1975 und 1987 um rund 40 % auf 22,6 GW (netto) ausgebaut.

**[47]** In den Wärmekraftwerken der DDR sind 67 % der Dampferzeuger und 50 % der Turbinen mehr als 20 Jahre alt, in der Bundesrepublik Deutschland da- gegen nur 7 %. Moderne Braunkohlekraftwerke ha- ben einen Wirkungsgrad von 38 %. Die DDR-Kraft- werke erreichen im Mittel aber nur einen Wirkungs- grad von 26 %. Gelänge es den Wirkungsgrad dieser Kraftwerke auf 38 % anzuheben und zugleich die Wir- kungsgrade anderer Verwendungen der mitteldeut- schen Braunkohle entsprechend heraufzusetzen, dann könnten jährlich 95 Mio. t Rohbraunkohle und 90 Mio. t CO<sub>2</sub>-Emissionen eingespart werden.

Ein um 40 % (von 200 auf 120 Mio. t) verringerter Ein- satz von Braunkohle zur Strom- und Wärmeerzeu- gung ergäbe jährlich ein Einsparpotential von 75 Mio. t CO<sub>2</sub>-Emissionen.

**[48]** Schon wegen des absehbaren Zurückfahrens der Braunkohle-Stromerzeugung und übrigens auch der Gefahr des „Festfrierens“ der stark wasserhaltigen mitteldeutschen Braunkohle während eines kal- ten Winters, wird es über kurz oder lang zu Stromver- sorgungs-Engpässen in der DDR kommen. Diesen Ef- fekt wird der durch rationellere Energienutzung indu- zierte Bedarfsrückgang nur teilweise kompensieren.

**[49]** Auf längere Sicht ist eine tragende Versorgung der DDR über Leitungen aus Westdeutschland keine Lösung. In der DDR müssen ausreichend Kapazitäten der Stromerzeugung geschaffen werden. Dabei muß auch an den Einsatz von Einfuhrkohle, von Erdgas und letztlich wohl auch von Kernenergie gedacht wer- den. Zur Errichtung dieser neuen Strukturen ist ein Engagement westdeutscher Versorgungsunterneh- men notwendig. Dieses Engagement ist mit dem am 22. August 1990 zwischen PreußenElektra, RWE- Energie und Bayernwerk einerseits und der DDR-Re- gierung sowie der Treuhandanstalt andererseits un- terzeichneten Verträgen auf den Weg gebracht wor- den.

**[50]** Rationalisierungsmöglichkeiten, allerdings ge- ringeren Ausmaßes liegen in den anderen Bereichen der Umwandlung von Primärenergie in Endenergie, vor allem durch Kraft-Wärme-Kopplung in den nun- mehr geschaffenen regionalen Energieversorgungs- unternehmen und im Raffineriebereich.

Positiv zu werten ist die in der DDR erreichte hohe Versorgungsgrad mit Fernwärme. So wird die verfügbare Primärenergie besser genutzt. Insgesamt nimmt die Fernwärmenutzung bei den Haushalten einen An- teil von ca. 25 % (Bundesrepublik: 8 %) ein.

**[51]** Eine breitenwirksamere Anwendung der Kraft- Wärme-Kopplung (in der DDR sank der Anteil des aus Kraft-Wärme-Kopplung erzeugten Stroms an der Ge- samterzeugung zwischen 1972 bis 1986 von 24 auf 12,7 %) insbesondere in der wärmeintensiven Klein- und Mittelindustrie führt bei einer erschließbaren Lei- stungsreserve von einem Gigawatt zu einem Investi- tionsminderbedarf in Milliardenhöhe verglichen mit

einem zu errichtenden konventionellen Kondensationskraftwerk gleicher Leistungsgröße und separater Wärmeerzeugung.

### 3.5.3 Stromwirtschaftlicher Verbund

[52] Bisher ist die DDR Mitglied im RGW-Stromverbundsystem „Frieden“. 1987 betragen ihre gesamten Stromausfuhren ca. 3,7 TWh (davon 3,4 TWh nach Polen), während sich die Einfuhren auf 7,5 TWh belaufen (1,6 TWh aus Polen, 5,9 TWh aus der CSFR – darin enthalten sind 1,8 TWh aus der UdSSR). Die DDR ist somit Nettoimporteur von Strom, allerdings nur in einer Größenordnung von weit unter 5 % des Bedarfs.

[53] Die notwendigen Sanierungsmaßnahmen in der Kraftwirtschaft werden das Tempo der Energieeinsparungen bald übertreffen.

In mittelfristiger Sicht wird es daher wegen des sich abzeichnenden Energienotstands im Gebiet der DDR zu Energie-, und hier vor allem Stromlieferungen aus der Bundesrepublik Deutschland als einzigen potenten Nachbar in die DDR kommen. Diese Lieferungen sind schon wegen der Schadstoff- und CO<sub>2</sub>-günstigeren Energieerzeugungsstruktur der Bundesrepublik Deutschland emissionsmindernd.

[54] Zur Anpassung an die unterschiedlichen Normen und Regelkonzepte in den Stromnetzen West- und Osteuropas ist eine besondere Gleichrichter-Netzakupplung erforderlich, die von der Preussen-Elektra bis Ende 1991 in Wolmirstedt bei Magdeburg installiert sein wird, um so eine Hochspannungsgleichstrom-Übertragung zu ermöglichen.

Die im Bau befindliche Kupplung der Bayernwerk AG in Etzenried nahe der Grenze zur Tschechoslowakei soll 1992 fertiggestellt sein.

[55] Kurzfristig wird auch an die technisch einfache Möglichkeit der Auskopplung eines Kraftwerksblocks aus dem westdeutschen Verbundnetz mit direktem Anschluß über eine separate Stromleitung an das DDR-Netz gedacht. Ein derartiger Richtbetrieb läßt Leistungsübertragungen in eine Richtung zu. Mit der Auskopplung des Kraftwerks Buschhaus stünde somit eine Stromlieferkapazität von bis zu 800 MWe zur Verfügung.

Um bis dahin gleichwohl Strom in die DDR liefern zu können, wurde das Kraftwerk der Preußen Elektra Offleben C (320 MWe) aus dem westdeutschen Verbundnetz ausgekoppelt. Es liefert Strom im Richtbetrieb der DDR über die inzwischen fertiggestellte Leitung Helmstedt-Wolmirstedt. Es ist allerdings offen, inwieweit diese maximale Kapazität von der DDR überhaupt in Anspruch genommen werden kann. Netzengpässe in Magdeburg könnten die vollständige Ableitung des gelieferten Stroms in das DDR-Verteilungsnetz zumindest kurzfristig verhindern.

Würden die Engpässe in den Stromleitungen und Netzkupplungen überwunden, so dürften verstärkte Stromlieferungen (Kraftwerkskapazitäten von ca. 4 GW) in den nächsten drei Jahren möglich sein. Darüber hinaus wäre es möglich, auch Stromlieferungen aus anderen westeuropäischen Staaten (z. B. Frankreich) in Richtung Osten auszubauen.

[56] In diesem Zusammenhang sei angemerkt, daß aufgrund einer schon Jahre zurückliegenden Verein-

barung ein Stromverbund zwischen einem Umschaltwerk der PreußenElektra in der Bundesrepublik Deutschland und der BEWAG in West-Berlin im Aufbau ist. Die Stromlieferungen an die BEWAG sollen 1992 aufgenommen werden.

[57] Die DDR wird im Zuge der Sanierung ihrer Energiewirtschaft vermehrt gefordert sein, in andere Länder des COMECON Strom zu liefern.

Sehr viel weiter geht daher die Überlegung, das Stromnetz der DDR in den Stromverbund der UCPTE einzubeziehen, was jedoch die Abkopplung der DDR vom übrigen RGW-Netz erforderlich machen würde. Neben allen politischen und technischen Problemen bliebe in diesem Fall insbesondere die Frage offen, in welcher Form die DDR dann ihren Lieferverpflichtungen gegenüber Polen nachkommen und wie sie den österreichischen Strom über die CSFR beziehen wird. Die Stromübertragungsprobleme, die derzeit an der deutsch-deutschen Grenze bestehen, werden sich dann an die deutsch-polnische und deutsch-tschechische Grenze verlagern.

Nach jüngsten Information ist schon Ende 1991 mit der Ausgliederung der DDR aus dem RGW-Netz und der Eingliederung in das UCPTE-Netz zu rechnen.

### 3.5.4 Kernenergie

[58] Von den vier Reaktorblöcken (jeweils 440 MW) in Lubmin bei Greifswald (vorher VEB Kombinat „Bruno Leuschner“) sind aufgrund eines Gutachtens der bundesdeutschen Gesellschaft für Reaktorsicherheit (GRS) inzwischen drei Blöcke wegen sicherheitstechnischer Mängel endgültig stillgelegt worden. Der vierte Block wird bis zum Ende des Jahres, sobald eine im Bau befindliches Ölkraftwerk die bisher aus diesem Block ausgekoppelte Wärmeversorgung von Greifswald übernehmen kann, außer Betrieb gesetzt werden.

Vier weitere Kernkraftblöcke von je 440 MW in Lubmin bei Greifswald (davon einer im Probelauf) und zwei weitere Blöcke des Typs Woronesch von je 1000 MW am Standort Stendal sind im Bau. Ob der Bau dieser Kraftwerke sowjetischer Konzeption mitgeführt werden kann ist in jeder Hinsicht fraglich, da sie den inzwischen in der DDR geltenden bundesdeutschen Sicherheitsanforderungen kaum genügen dürften.

[59] Nach Auffassung eines Teiles der unterzeichnenden Mitglieder wäre ein sorgfältiger geplanter Ausbau der Kernenergie, der die neuesten Erkenntnisse der Reaktorsicherheit nutzt, der wohl geeignetste Weg einer Neuorientierung der DDR-Energiewirtschaft mit den Zielen der Verbesserung der Versorgungssicherheit, der Kostenminimierung und der Reduktion der CO<sub>2</sub>- und der Schadstoff-Emissionen, welche derzeit unerträglich hohe Belastungen verursachen. Aus vielen wohlbekannten Gründen muß aber dahingestellt bleiben, ob die für die Energiepolitik und Energiewirtschaft Verantwortlichen diesen Weg in absehbarer Zeit gehen werden.

[60] Inzwischen hat die Sowjetunion angekündigt, daß sie aus dem unter sowjetischen Regime betriebenen Uranerzbergbau im Gebiet der DDR – der



Sowjetisch-Deutschen Aktiengesellschaft (SDAG) Wismut – bis zum Ende dieses Jahres aussteigen werde. Die Gewinnungskosten des im Erzgebirge und in der Sächsischen Schweiz betriebenen Uranerzbergbaus lägen deutlich über dem Weltmarktpreis. 1990 sollten ursprünglich noch 6000 Tonnen Urankonzentrat zur Deckung des sowjetischen Bedarfs an Kernbrennstoffen gewonnen werden. Diese Menge wurde bereits im März dieses Jahres auf 2500 Tonnen verringert. Betroffen sind über 34000 Beschäftigte dieses zuletzt unter strengster Geheimhaltung betriebenen größten Bergbaubetriebs seiner Art in Europa.

**3.6 Möglichkeiten einer Reduktion der CO<sub>2</sub>-Emissionen im Bereiche der Energienutzung**

**3.6.1 Haushalte und Kleinverbraucher – Niedertemperaturwärme**

Rationalisierung der Energienutzung

[61] Diese Möglichkeit, in diesen Bereichen Energie zu sparen, ist noch weitgehend unerschlossen. Wichtigstes Aktionsfeld ist der Wärmeverbrauch in den Haushalten und in Gewerbe und Industrie. Ins Gewicht fällt nicht nur die Verringerung des Energieverbrauchs, die von einer Erhöhung der Energie-, und im besonderen der Elektrizitätspreise auf kostendeckendes Niveau ausgehen wird.

[62] Für den in privaten Haushalten verbrauchten Strom gilt nach wie vor der nach dem „Stopppreis“ von 1936 ausgerichtete „Friedenspreis“ (Arbeits- und Grundpreis) von ca. 8 Pf/kWh. In der BRD liegt der vergleichbare Preis bei 24 Pf/kWh. Die durchschnittlichen Industriepreise für Elektrizität lagen 1989 für Nieder-, Mittel- und Hochspannung bei etwa 15 Pf/kWh. Die Stromerzeugungskosten unter Ein-schluß der Kosten für den Umweltschutz liegen in einer Größenordnung von 25 Pf/kWh.

Im Bereich der leitungsgebundenen Energiewirtschaft werden jährlich Preissubventionen, vor allem zugunsten der Haushalte und Kleinverbraucher, in Höhe von etwa 8 Milliarden Mark gezahlt, das sind rund 15 % der Gesamtsumme der Preissubventionen. Die Bürger in der DDR brauchen im Vergleich zur Bundesrepublik wesentlich weniger ihres Einkommens für Haushaltenergie (Strom, Wasser, Gas, Heizung) auszugeben. Dieser Beitrag wird für die DDR-Haushalte auf lediglich 2 % geschätzt; in der Bundesrepublik sind es dagegen – je nach Haushaltstyp – 5 bis 9 %. Durch die subventionierten Preise (vgl. Tabelle 7) fehlen aber auch die Anreize, die Energieträger rationell zu bewirtschaften.

[63] Der Energieverbrauch der Haushalte und Kleinverbraucher kann darüber hinaus deutlich reduziert werden

- durch bislang weitgehend fehlende Wärmedämmung,
- dadurch, daß Möglichkeiten geschaffen werden, die Heizungen – ggf. mittels Thermostaten – zu regulieren, insbesondere bei fernwärmebeheizten Wohnungen (Potential: bis zu 25 % der für Heizungszwecke aufgewandten Energie),
- durch verbesserte Warmwasserbereitung,
- durch den Einsatz energiesparender Haushaltsgeräte.

Die Größe dieses Potentials ist daran zu erkennen, daß ein Haushalt in der DDR immerhin 3 bis 4 mal mehr Energie verbraucht als ein Haushalt in der Bundesrepublik.

[64] Die *Wohnungsmieten* sind durchweg nicht kostendeckend. Den Vermietern fehlen deshalb ausreichende Mittel, um die Wohnungen instandzuhalten.

Einige Kenndaten illustrieren diese Lage:

Tabelle 11

**Kenndaten der Wohnungswirtschaft der DDR**

	DDR	Bundesrepublik Deutschland	DDR, Bundesrepublik Deutschland = 100
Wohnungen auf 1 000 Einwohner . . . . .	411	444	93
Wohnfläche/cap. in m <sup>2</sup> . . . . .	26	37	70
Alter der Wohnungen: bis 1918 in % . . . . .	42	19	
1919 bis 1945 in % . . . . .	17	14	
seit 1945 in % . . . . .	41	67	
Miete für eine Zwei-Zimmer-Wohnung in Mark . . . . .	75	390	19
Arbeitszeit in Stunden für die Monatsmiete . . . . .	13	26	50
Investitionserfordernisse in Mrd. Mark . . . . .	500	—	—

Quelle: Zahlenspiegel des Innerdeutschen Ministeriums, 1988

### 3.6.2 Industrie/Prozeßwärme

[65] Dieser Sektor hat einen Anteil von 40 % am Gesamtstromverbrauch und ist gekennzeichnet durch besonders ineffiziente energieintensive Produktionszweige.

Einige Daten:

Zur Herstellung von Elektro Stahl braucht die DDR 40 % mehr Energie als technisch notwendig wäre, bei Ätznatron sind es 22 %, bei Aluminium 11 %. Um eine Tonne Zement herzustellen, werden mit bester Technik 62 kWh, in der DDR dagegen 110 kWh Strom benötigt. Allein die Produktion von Karbid beanspruchte bisher 7 % des Gesamtenergieverbrauchs und 21 % des gesamten Stromverbrauchs der chemischen Industrie. Eine Verringerung der Karbidproduktion im Kombinat Chemische Werke Buna um nur 300 000 t (ca. 30 % der Gesamtproduktion) brächte bereits Einsparungen in Höhe von 1,1 TWh Strom, 130 000 t Steinkohlenskoks und 70 000 t BMT-Koks. Andere energieintensive Erzeugnisse sind Schwefelsäure, Flachglas, Viskosefaser u. a..

In der chemischen Industrie hat die Veredelung von Braunkohle zu hochwertigen Energieträgern sowie zu Grundstoffen eine lange Tradition. Der Verbrauch betrug 1989 ca. 15 Mio. t SKE. Die damit verbundene hohe Umweltbelastung wird nur teilweise dadurch kompensiert, daß der relative Anteil der chemischen Industrie am industriellen Verbrauch zurückgeht (1970: 55 %, 1987: 40 % Anteil am industriellen Stromverbrauch).

[66] Dieser Trend zu einer weniger energieintensiven Produktionsstruktur könnte durch folgende Maßnahmen unterstützt werden:

- den Ausbau elektrotechnischer Produktionsverfahren. Der Einsatz der Phosphorsäureerzeugung anstelle von Lichtbogen- oder Induktionsschmelzen reduziert den spezifischen Stromverbrauch von 650 kWh/t auf 400 kWh/t. Die Einführung der Druckwellentechnologie beim Gußputzen bzw. Entkernen anstelle des Grundputzens mittels Druckluft mindert den Strombedarf auf ein Zehntel.
- Die Erhöhung des energetischen Niveaus technologischer Wärmeanwendungsprozesse durch Bereitstellung von Industrieöfen und Trocknern mit effizienter Technik führt bei einem gegenwärtigen Bestand von über 30 000 Industrieöfen, Trocknungsanlagen und thermischen Apparaten mit einem Gesamt-Jahresverbrauch von ca. 35 Mio. t SKE zu einer Reduzierung des Energieverbrauchs von ca. 10 %.

### 3.6.3 Verkehr

[67] 1988 erreichten die Eisenbahnen und der öffentliche Straßenpersonenverkehr (ÖSPV) folgende Anteile am Güterverkehr, gemessen Tonnenkilometern, und am Personenverkehr, gemessen in Personenkilometern:

Tabelle 12

	Güterverkehr Eisenbahn	Personenverkehr	
		Eisenbahn	ÖSPV
DDR .....	76 %	20 %	22 %
Bundesrepublik Deutschland .....	23 %	6 %	9 %

Die Kraftfahrzeugdichte und die durchschnittliche Fahrleistung sind recht verschieden:

Tabelle 13

	DDR	Bundesrepublik Deutschland	DDR, Bundesrepublik Deutschland = 100
Pkw/1 000 Einwohner .....	225	470	48
im Jahresdurchschnitt im Individualverkehr erreichte Zahl der Personenkilometer .....	4 900	9 000	54

[68] Verkehrspolitik ist in der DDR ein weites Feld, das schon deshalb anders liegt als in der Bundesrepublik Deutschland, weil der Status geprägt ist durch die nach wie vor vorrangige Eisenbahn und durch eine wenig fortgeschrittene Motorisierung mit Kraftfahrzeugen, die westlichen Umweltansprüchen auch nicht entfernt genügen.

Aussagen über eine mögliche Verringerung des Energieverbrauchs und der Schadstoff- und CO<sub>2</sub>-Emissionen werden erst möglich sein, sobald ein perspektivisches Verkehrskonzept vorliegt.

In dieser Analyse beschränken wir uns darauf, zu unterstellen, daß sich die Verkehrswirtschaft im Gebiet der DDR in ihren Strukturen, in ihren Kenndaten und damit auch in ihren Emissionen im Laufe der vor uns liegenden 15 Jahre der Verkehrswirtschaft das Bundesgebiet weitestgehend angleicht.

### 3.7 Die Entwicklung des Energieverbrauchs und der CO<sub>2</sub>-Emissionen im Gebiet der DDR bis zum Jahre 2005 – Versuch einer Abschätzung

[69] Wir gehen von folgenden Annahmen aus:

- 1) Durch die bereits in der DDR in Angriff genommenen Maßnahmen werden in einer ersten Phase die Kenndaten der Energieversorgung und des Umweltschutzniveaus innerhalb der nächsten 10 bis 15 Jahre an den bislang im Bundesgebiet erreichten Status angeglichen. Dies gilt für die gesamte Energieversorgung, ausgenommen den Energieverbrauch des Verkehrs. Dies könnte erreicht werden durch eine Senkung des Primärenergiever-

brauchs der DDR-Energiewirtschaft (ausgenommen den Verkehr) um jährlich eineinhalb bis zwei Prozent und einer Abkehr von der Braunkohle mit dem Ergebnis einer Verringerung der mitteldeutschen Braunkohleförderung von 300 auf 160 bis 180 Mio. t p.a..

- 2) In einer zweiten, mit der ersten sich überlappenden Phase werden auf die Energiewirtschaft im Gebiete der DDR Maßnahmen angewandt, die den Maßnahmen für das Bundesgebiet im Rahmen des Reduktionsszenarios „Energiepolitik“ entsprechen. Es wird aber unterstellt, daß diese Maßnahmen nur zu spezifischen Reduktionen der CO<sub>2</sub>-Emissionen führen, die zwei Drittel der für das Bundesgebiet erwarteten Reduktionen ausma-

chen. Auch dies gilt für die gesamte Energieversorgung, ausgenommen den Energieverbrauch des Verkehrs.

- 3) Es wird erwartet, daß der Pro-Kopf-Energieverbrauch der Verkehrswirtschaft im Gebiete der DDR bis zum Jahre 2005 auf den im Rahmen des Reduktionsszenarios „Energiepolitik“ im Bundesgebiet für das gleiche Jahr erwarteten Pro-Kopf-Energieverbrauch der Verkehrswirtschaft ansteigt.

**[70] Rechengang**

Damit die Prognosen hinsichtlich Energieverbrauch und Emissionsreduktionen nachvollzogen werden können, wird nachstehend der Rechengang dargestellt:

Tabelle 14

**Emissionen im Gebiet der Bundesrepublik Deutschland**

Angaben in Mio. t CO<sub>2</sub> p. a.

	insgesamt	davon Verkehr	Rest
Status 1987 .....	715	141 <sup>1)</sup>	574
Reduktionsszenario „Energiepolitik“ 2005 .....	510	129 <sup>2)</sup>	381
Reduktion absolut ..	205	12	193
Reduktion in v. H. ..	28,7 %	8,5 %	33,6 %
davon zwei Drittel ..			22,4 %
Emissionen der Verkehrswirtschaft in 2005: 129 Mio. t CO <sub>2</sub> das sind pro Einwohner (60 Mio. Einwohner): 2,15 t CO <sub>2</sub> /cap p. a.			

1) 19,7 % des Primärenergieverbrauchs – „A-Gesamt“ Tabelle 2.2–2  
 2) „A-Gesamt“ Tabelle 4.1.2–13

Tabelle 15

**Energieverbrauch ohne den Verkehr im Gebiet der DDR \*)**

Angaben in Mio. t SKE p. a.

Primärenergieverbrauch der DDR in 1988 .....	124,2 Mio. t
davon Verkehr (geschätzt auf der Grundlage des Verbrauchs von Benzin und Diesel – 60 % von 17 Mio. t SKE p. a., zuzüglich 10 % für den nicht-ölverbrauchenden Verkehr) .....	– 11,2 Mio. t
verbleibender Primärenergieverbrauch .....	113,0 Mio. t
Reduktion um 1,5 bis 2,0 % p. a. während 15 Jahren: 23,1 bis 29,8 Mio. t, Mittelwert .....	– 26,3 Mio. t
verbleibender Energieverbrauch ohne Verkehr .....	86,7 Mio. t
Reduktion in Phase 2 um 18,4 % in analoger Anwendung des Reduktionsszenarios „Energiepolitik“ auf die DDR .....	– 16,0 Mio. t
Verbleibender Primärenergieverbrauch in 2005 ohne den Verbrauch des Verkehrssektors ...	<u>70,7 Mio. t</u>

\*) Wie bis zum 3. 10. 1990  
 1) Angesetzt sind 2,72 t CO<sub>2</sub>/t SKE entsprechend den Ergebnissen des Reduktionsszenarios „Energiepolitik“:  
 Verringerung des Primärenergieverbrauchs von 314,1 auf 240,1 um 74 Mio. t SKE p. a., d. i. um 23,6 %  
 Verringerung der CO<sub>2</sub>-Emissionen von 715 auf 510 um 205 Mio. t SKE p. a., d. i. um 28,7 %  
 Eine Reduktion der CO<sub>2</sub>-Emissionen um 22,4 % (2/3 des für das Bundesgebiet ermittelten Betrages) entspricht somit einer Reduktion des Energieverbrauchs um 18,4 %, wie sie oben angesetzt ist.

Tabelle 16

## Emissionen im Gebiet der DDR

	Primärenergie- Verbrauch	Emissionsfaktor	CO <sub>2</sub> -Emissionen
	Mio. t SKE	t CO <sub>2</sub> /t SKE	Mio. t CO <sub>2</sub>
Braunkohle .....	85,5	3,25	279,7
Steinkohle .....	4,8	2,69	12,9
Mineralöl .....	17,0	2,28	38,8
Gase .....	12,4	1,63	20,2
	119,7		351,6
sonst. Energieträger .....	4,5		
insgesamt .....	124,2		
Emissionen insgesamt der DDR in 1988 .....			351,6
davon Verkehr (60 % der dem Mineralölverbrauch zugerechneten Emissionen von 38,8 Mio. t CO <sub>2</sub> , zuzüglich 10 % für den nicht-ölverbrauchenden Verkehr) .....			25,6
Emissionen in der DDR 1988 (Verkehr ausgenommen) .....			326,0
Reduktion der Emissionen in der DDR um 1,5 bis 2,0 % p. a. zwischen 1990 und 2005 – Mittelwert: 1,75 % p. a., das sind kumuliert 23,3 % – in Phase 1: .....			76,0
verbleiben .....			250,0
Effekt des Switch „weg von der Braunkohle“ <sup>1)</sup> .....			47,9
Emissionen in der DDR 2005 *) (Verkehr ausgenommen) .....			202,1
Reduktion der Emissionen zwischen 1988 und 2005 .....			123,9

\*) Wie bis zum 3. 10. 1990

1) Annahmen: Braunkohlenförderung 1988 300 Mio. t oder 85,5 Mio. t SKE

Eine lineare Reduktion der Braunkohlenförderung zwischen 1990 und 2005 um 18,4 % führt zu einer Braunkohlenförderung von 244,8 Mio. t oder 69,8 Mio. t SKE in 2005.

Um in 2005 zu einer Förderung von 160 bis 180 Mio. t Rohbraunkohle zu gelangen – angesetzt Mittelwert: 170 Mio. t Rohbraunkohle oder 48,5 Mio. t SKE – müßte die Jahresförderung um weitere 74,8 Mio. t oder 21,3 Mio. t SKE verringert und der Ausfall durch Einsatz anderer Energieträger gedeckt werden.

Die spezifischen Emissionen der Braunkohle sind 3,25 t CO<sub>2</sub>/t SKE.

Unter Berücksichtigung des Beitrages CO<sub>2</sub>-freier Energieträger – ggf. auch im Wege von Einfuhren in die DDR – werden die spezifischen Emissionen der substituierenden Energieträger angesetzt mit 1,0 t CO<sub>2</sub>/t SKE.

Für 21,3 Mio. t errechnet sich danach die Verringerung der Emissionen um 47,9 Mio. t CO<sub>2</sub>

## [71] Ergebnis:

Tabelle 17

## Entwicklung des Energieverbrauchs und der Emissionen im Gebiet der DDR \*)

	Primär- energie- Verbrauch	CO <sub>2</sub> - Emis- sionen
	Mio. t SKE	Mio. t CO <sub>2</sub>
Status 1988 .....	124,2	351,6
erwartet in 2005		
ohne den Verkehr .....	70,7	202,1
Verkehr .....	15,8 <sup>1)</sup>	34,4 <sup>2)</sup>
insgesamt .....	86,5	236,5
Verringerung zwischen 1988 und 2005		
absolut .....	-37,7 %	-115,1
in v. H. bezogen auf 1988	-30,1 %	- 32,7 %

\*) Wie bis zum 3. 10. 1990

1) In der Bundesrepublik verursacht in 2005 der Primärenergieverbrauch des Verkehrs in Höhe von 59,1 Mio. t SKE Emissionen im Betrage von 129 Mio. t CO<sub>2</sub>. Auf dieser Grundlage errechnet sich für die DDR ein Energieverbrauch des Verkehrs in 2005 von 15,8 Mio. t SKE.

2) Emissionen des Verkehrs in der Bundesrepublik in 2005 2,15 t CO<sub>2</sub>/cap

Bezogen auf die für das Jahr 2005 in der DDR erwarteten 16 Mio. Einwohner ergibt dies eine Emission von 34,4 Mio. t CO<sub>2</sub>

Emissionen des Verkehrs in der DDR in 1988: 25,6 Mio. t CO<sub>2</sub>

oder 1,60 t CO<sub>2</sub>/cap

Mehremissionen mithin: 8,8 Mio. t CO<sub>2</sub> p. a.

### 3.8 Reduktion der CO<sub>2</sub>-Emissionen in einem vereinten Deutschland

[72] Die zwei nachstehenden Tabellen zeigen sowohl für die beiden Teile Deutschlands, als auch für Deutschland als Ganzes die Versorgung mit Primärenergie und die energiewirtschaftliche Außenhandelsverflechtung.

Tabelle 18

#### Primärenergieverbrauch 1988

in Mio. t SKE

	DDR *)		Bundesrepublik Deutschland *)		Deutschland	
Steinkohle .....	4,8	3,8 %	74,9	19,2 %	79,7	15,5 %
Braunkohle .....	85,5	68,9 %	31,6	8,1 %	117,1	22,8 %
Mineralöl .....	17,0	13,7 %	163,5 <sup>1)</sup>	41,9 %	180,5	35,1 %
Erdgas .....	12,4	10,0 %	63,4	16,3 %	75,8	14,8 %
Primärelektrizität .....	4,5	3,6 %	54,3	13,9 %	58,8	11,4 %
sonst. (nur BRD) .....	—	—	2,1	0,5 %	2,1	0,4 %
insgesamt .....	124,2	100 %	389,8 <sup>1)</sup>	100 %	514,0	100 %

\*) Wie bis zum 3. 10. 1990

<sup>1)</sup> Arbeitsgemeinschaft Energiebilanzen einschließlich 18 Mio. t SKE nicht-energetischem Verbrauch — überwiegend Mineralölprodukte —, der nicht in die Emissionsberechnung eingeht.

Tabelle 19

#### Primärenergie-Außenhandelssalden 1988 in Mio. t SKE

Importsaldo: +

Exportsaldo: -

	DDR	Bundesrepublik Deutschland	Deutschland	
				Import-Abhängigkeit
Steinkohle .....	+ 4,8	+ 0,8 *)	+ 5,6	+ 7,0 %
Braunkohle .....	- 6,6	- 0,6	- 7,5	- 6,4 %
Mineralöl .....	+16,9	+162,1	+179,0	+99,2 %
Erdgas .....	+ 7,8	+ 46,2	+ 54,0	+71,2 %
Primärelektrizität .....	+ 0,6	+ 1,3	+ 1,9	+ 3,2 %
insgesamt .....	+23,5	+209,8	+233,0	+45,3 %
v. H. des Energieverbrauchs .....	18,9 %	53,8 %	45,3 %	

\*) Importe: 8,6 Mio. t, Exporte 9,4 Mio. t

[73] Werden die üblichen Emissionskoeffizienten zugrunde gelegt, dann errechnet sich für 1988 die folgende Emissionsbilanz beider Teile Deutschlands:

Tabelle 20

**CO<sub>2</sub>-Emissionen 1988**

in Mio. t

	DDR	Bundesrepublik Deutschland	Deutschland	
	Steinkohle .....	12,9	201,5	214,4
Braunkohle .....	259,3 <sup>1)</sup>	102,7	362,0	33,8 %
Mineralöl .....	38,8	331,7 <sup>2)</sup>	370,5	34,6 %
Erdgas .....	20,2	103,3	123,5	11,6 %
	331,2	739,2	1 070,4	100 %
Anteile .....	30,9 %	69,1 %	100 %	

<sup>1)</sup> Unter Berücksichtigung eines Abschlages hier auf die Braunkohle-Emissionen für den nicht-energetischen Verbrauch entsprechend dem Anteil in der Bundesrepublik (in der Emissionsrechnung anzusetzender Braunkohleverbrauch nunmehr 79,9 statt 85,5 Mio. t SKE)

<sup>2)</sup> Nicht eingerechnet ist der nicht-energetische Verbrauch

[74] Es muß nun der Versuch unternommen werden, die oben für das Gebiet der DDR nach den Kriterien des Reduktionsszenarios „Energiepolitik“ für das Jahr 2005 ermittelten Daten für den Primärenergieverbrauch und die CO<sub>2</sub>-Emissionen auf den einzelnen Energieträger aufzuschlüsseln und zugleich mit den entsprechenden Daten für das Bundesgebiet zusammenzufassen. Nach der vorangehenden Analyse stehen als Eckwerte für das Gebiet der DDR lediglich Verbrauch und Emissionen insgesamt und für die Braunkohle fest, die letzteren allerdings mit beachtlichen Anteilen an den Gesamtbeträgen:

– Anteil der Braunkohle am gesamten Primärenergieverbrauch des Gebietes der DDR im Jahre 2005: 48,5 %

– Anteil der Braunkohle an den gesamten CO<sub>2</sub>-Emissionen des Gebietes der DDR im Jahre 2005: 66,9 %

Mehr oder minder willkürlich ist dagegen die Aufschlüsselung der übrigen Energieträger. Diese Aufgliederung soll nur eine plausible Energieversorgungsstruktur des Gebietes der DDR im Jahr 2005 widerspiegeln. Dies reicht aus für die weiteren Überlegungen.

Tabelle 21

**Primärenergieverbrauch im Jahre 2005 in Mio. t SKE nach den Kriterien des Reduktionsszenarios „Energiepolitik“**

Für das Gebiet der DDR als Versuch einer Aufteilung

	DDR-Gebiet *)		Bundesgebiet *)		Deutschland	
	Steinkohle .....	10	11,6 %	39,4	12,8 %	49,4
Braunkohle .....	48,5 <sup>1)</sup>	56,0 %	21,1	6,8 %	69,6	17,6 %
feste Brennstoffe .....	58,5	67,6 %	50,5	19,6 %	119,0	30,1 %
Mineralöl .....	16 <sup>1)</sup>	18,5 %	87,1	28,2 %	103,1	26,1 %
Erdgas .....	9	10,4 %	92,5	30,0 %	101,5	25,7 %
Kohlenwasserstoffe .....	25	28,9 %	179,6	58,2 %	204,6	51,8 %
Fossile Brennstoffe .....	83,5	96,5 %	240,1	77,8 %	323,6	81,9 %
Sonstige E-Träger .....	3	3,5 %	68,4	22,2 %	71,4	18,1 %
insgesamt .....	86,5	100 %	308,5 <sup>2)</sup>	100 %	395,0	100 %

\*) Wie bis zum 3. Oktober 1990

<sup>1)</sup> Darin 2 Mio. t SKE nicht-energetischer Verbrauch

<sup>2)</sup> Ohne den nicht-energetischen Verbrauch; entsprechend der Urfassung des Berichts „A-Gesamt“

Tabelle 22

**Emissionen im Jahr 2005 in Mio. t CO<sub>2</sub> nach den Kriterien des Reduktionsszenarios „Energiepolitik“**

	DDR-Gebiet *)		Bundesgebiet *)		Deutschland	
Steinkohle .....	27	12,0 %	106	20,2 %	133	17,7 %
Braunkohle .....	151 <sup>1)</sup>	67,1 %	69	13,1 %	220	29,8 %
feste Brennstoffe .....	178	79,1 %	175	33,3 %	353	47,1 %
Mineralöl .....	32 <sup>1)</sup>	14,2 %	199	37,9 %	231	30,3 %
Erdgas .....	15	6,7 %	151	28,8 %	166	22,1 %
Kohlenwasserstoffe .....	47	20,9 %	350	66,7 %	397	52,9 %
Fossile Brennstoffe .....	225	100 %	525	100 %	750	100 %
Sonstige E-Träger .....	—	—	—	—	—	—
insgesamt .....	225	100 %	525	100 %	750	100 %
Anteile .....	30 %		70 %		100 %	

\*) Wie bis zum 3. Oktober 1990

1) Auch für das DDR-Gebiet wurde ein den Ansätzen für das Bundesgebiet entsprechender Abschlag bei dem in der Emissionsminderung irrelevanten nicht-energetischen Verbrauch vorgenommen, und zwar je zur Hälfte bei der Braunkohle und beim Mineralöl.

Tabelle 23

**CO<sub>2</sub> Emissionen 1988 und 2005 in Mio. t**

Entwicklung nach den Kriterien des Reduktionsszenarios „Energiepolitik“  
Für das Gebiet der DDR als Versuch einer Aufteilung

	DDR-Gebiet *)		Bundesgebiet *)		Deutschland		
	1988	2005	1988	2005	1988	2005	1988=100
Steinkohle .....	12,9	27	201,5	106	214,4	133	62,0
Braunkohle .....	259,3	151	102,7	67	362,0	220	60,8
Mineralöl .....	38,8	32	331,7	199	370,5	231	62,3
Erdgas .....	20,2	15	103,3	151	123,5	166	134,4
	331,2	225	739,2	525	1 070,4	750	70,1
1988=100 .....	68,0		71,0		70,1		

\*) Wie bis zum 3. Oktober 1990

[75] Ungeachtet der Unsicherheiten bei der Aufschlüsselung der Anteile der Energieträger – ausgenommen Braunkohle – auf den Energieverbrauch und Emissionen des Gebietes der DDR im Jahre 2005 zeigen die beiden für das Vereinte Deutschland in diesem Jahre erwarteten Energieversorgungs- und Emissions-Strukturen folgendes:

1) Der Verbrauchs- und Emissionsanteil der Braunkohle wird für das Gebiet der DDR zwar deutlich niedriger liegen als derzeit, mit 18 % bzw. 33 % im Vereinten Deutschland die Anteile der Steinkohle (13 % bzw. 18 %) aber übertreffen.

2) Das Gebiet der DDR muß und wird sich Energieimporten öffnen, ohne daß das Mengen- und Emissionsverhältnis der drei in Frage kommenden Energieträger – Steinkohle, Öl und Erdgas – vorgebestimmt werden kann. Ihr Versorgungsanteil für diesen Teil des Vereinten Deutschlands wird 40 % und ihr Emissionsanteil 33 % erreichen. Er liegt damit aber weiterhin deutlich unter den entsprechenden Anteilen im Bundesgebiet: 61 % und 87 %.

3) CO<sub>2</sub>-freie Energieträger – Wasserkraft, „neue Erneuerbare“ und Kernenergie – werden im Gebiet

der DDR auch im Jahr 2005 nur eine nachrangige Rolle spielen. Was die Kernenergie angeht, so liegt dies an der Vorgabe für das Reduktions-Szenario „Energiepolitik“, keine neuen Kernkraftwerke in Betrieb zu nehmen. Werden – nach gehöriger Nachrüstung – die im Bau befindlichen Blöcke in Greifswald und Stendal bis 2005 in Betrieb genommen und die beiden anderen Blöcke in Stendal gebaut und gleichfalls in Betrieb genommen, dann wird der Anteil der „Sonstigen Energieträger“ signifikant steigen mit der Folge einer möglichen weitgehenden Verringerung der Einfuhren von fossilen Energieträgern. Auf diesem Wege könnte für das Gebiet der DDR das Maß der Reduktion der CO<sub>2</sub>-Emissionen wesentlich über den oben ermittelten Satz von 32,7 % angehoben werden.

[76] Grundsätzlich ist aber folgendes klarzustellen:

Die hier gegebene Darstellung der Energieversorgungs- und Emissions-Entwicklung in beiden Teilen Deutschlands basiert auf den Prinzipien der in den Studien vorgelegten Reduktionsstrategie „Energiepolitik“. Diese für das Bundesgebiet konzipierte Strategie sieht weitgehende Selbstgenügsamkeit der Energiewirtschaft vor. Sie läßt kaum Raum für eine der Dynamik der gestellten Aufgabe gerecht werdenden Verstärkung des Austauschs von Energie mit den Ländern der westlichen Welt, noch zieht sie eine energiewirtschaftliche und energiepolitische Kooperation mit den östlichen Staatshandelsländern auch nur in Betracht.

Der Staatsvertrag und die Einheit Deutschlands fordern aber gerade dazu heraus, diese Einheit auf dem Gebiet der Energiewirtschaft so schnell wie möglich herzustellen. Dies bedeutet energiepolitische Abstimmung, energiewirtschaftliche Kooperation und Austausch von Energie über die nunmehr beseitigte Grenze. Hier liegt die große Chance der Verwirklichung des Zieles weitgehender Reduktion der Emissionen klimaschädlicher Spurengase. Wird diese Aufgabe wahrgenommen, dann wird es möglich, vorgegebene Reduktionsziele leichter zu verwirklichen. Darüber hinaus könnten zusätzliche Reduktionspotentiale erschlossen werden.

Das hier vorgelegte Programm geht diesen Weg.

#### 4. Rahmenbedingungen und grundlegende Optionen

##### 4.1 Vorbemerkungen

[1] In diesem Kapitel wird gezeigt, in welchen Punkten wir den Annahmen des Reduktions-Szenarios „Energiepolitik“ im Bericht über die zusammenfassenden Ergebnisse der Studienkomplexe A1 bis A6 nicht folgen und welche Ergebnisse sich aus unseren abweichenden Annahmen ableiten lassen.

In diesem Zusammenhang werden auch die Gründe dargelegt, warum wir weder den beiden Ausstiegs-Szenarien, noch dem Ausbau-Szenario zuzustimmen vermögen.

Alle Aussagen beziehen sich auf das vereinte Deutschland.

## 4.2 Annahmen zur Entwicklung der Bevölkerung

### 4.2.1 Prognos-Vorgaben

[2] Den Studien liegen die von Prognos, Basel im Auftrage des Bundesministeriums für Wirtschaft entwickelten Annahmen über die *Bevölkerungsentwicklung* im Bundesgebiet zugrunde:

Jahresmitte 1987:	61.1 Mio. Einwohner
1990:	62.0 Mio. Einwohner
2005:	60.0 Mio. Einwohner
2050:	zwischen 38.8 und 50.0 Mio. Einwohner

Diese Vorgaben widersprechen den jüngsten Erkenntnissen und Erwartungen über die Entwicklung der Bevölkerung des Bundesgebietes.

### 4.2.2 Jüngere Voraussagen

[3] Jüngste Schätzungen des Deutschen Instituts für Wirtschaftsforschung (DIW) in Berlin gehen aber davon aus, daß sich die Bevölkerung des Bundesgebietes bis 2005 von gegenwärtig (Mitte 1990) 62,5 Millionen bis zum Jahre 2005 um 2,5 Millionen auf 65 Millionen Einwohner erhöhen wird.

Das DIW gibt die folgende Zahlenreihe der längerfristigen Entwicklung der Bevölkerungszahl in den beiden Teilen Deutschlands:

Tabelle 1

#### Voraussichtliche Bevölkerungsentwicklung

Jahr	Bundesgebiet	DDR-Gebiet	Deutschland
1939 . . . . .	43,0 Mio.	16,8 Mio.	59,8 Mio.
1949 . . . . .	49,2 Mio.	18,8 Mio.	68,0 Mio.
1970 . . . . .	60,6 Mio.	17,1 Mio.	77,7 Mio.
1989 . . . . .	61,2 Mio.	16,5 Mio.	78,2 Mio.
1990 . . . . .	62,5 Mio.	16,0 Mio.	78,5 Mio.
2000 . . . . .	65,7 Mio.	14,5 Mio.	80,2 Mio.
2020 . . . . .	61,1 Mio.	12,9 Mio.	74,0 Mio.
2040 . . . . .	51,6 Mio.	10,7 Mio.	62,3 Mio.

Quelle: DIW

Mittelfristig dürfte diese Vorausschau den gegenwärtigen Erwartungen entsprechen\*). Auf lange Sicht könnte auch der zunehmende Bevölkerungsdruck aus

\*) Das Institut der Deutschen Wirtschaft in Köln ist in einer Analyse von Bernd Hof „Gesamtgesellschaftliche Perspektiven zur Entwicklung der Bevölkerung und des Arbeitskräfteangebots 1990-2005“ gelangt zu der Feststellung, daß in der vom Verfasser am ehesten zutreffenden Variante 3 die Bundesrepublik im Jahre 2005 63,4 Mio. Einwohner zählen wird. Der Verfasser weist aber darauf hin, daß in dieser Rechnung einmal Asylanten nicht berücksichtigt sind und andererseits die Annahme eingeht, daß ab 1998 kein Wanderungsgewinn mehr zu verzeichnen ist. Dies setzt im Augenblick nicht vorgesehene Maßnahmen voraus. Diese Interpretation führt uns dazu, an den für 2005 65 Mio. Einwohnern festzuhalten.



den von Klimaveränderungen stark betroffenen südlichen Ländern einer langfristig abnehmenden Bevölkerung Deutschlands entgegenwirken.

#### 4.2.3 Berichtigte Bevölkerungsprognose

[4] Aufgrund dieser Erkenntnisse gehen wir davon aus, daß sich bis zum Eckjahr unserer Szenarien, dem Jahr 2005, die Einwohnerzahl des Bundesgebiets auf 65 Millionen erhöhen wird. An die Stelle einer Verminderung von gegenwärtig 62,5 Millionen auf die den Studien vorgegebenen 60 Millionen tritt also viel eher eine Vermehrung der Einwohnerzahl um eben dieselbe Zahl.

[5] Eine längerfristige Aussage ist schwieriger, da es kaum möglich ist, die weltweiten Migrationsbewegungen abzuschätzen. Wir sollten uns aber bewußt sein, daß sich die Weltbevölkerung von gegenwärtig etwa 5,2 Milliarden Menschen bis zum Jahre 2050 um schätzungsweise 1,0 % p.a. d. h. um etwa 80 % auf 8 bis 10 Milliarden Menschen vermehren wird. (Nach dem jüngsten Bevölkerungsbericht der Vereinten Nationen wird bis zum Ende des nächsten Jahrhunderts mit einer Weltbevölkerung von 11 Milliarden Menschen gerechnet.) Unter diesen Umständen ist die Annahme höchst spekulativ, die Bevölkerung des Bundesgebiets werde in der gleichen Zeit von gegenwärtig 62,5 Millionen Einwohnern auf 39 bis 50 Millionen Einwohner, d. h. um 20 % bis 38 % zurückgehen. Dies zeugt von wenig Realismus.

[6] Wir setzen die Einwohnerzahl des Bundesgebiets für die Mitte des nächsten Jahrhunderts mit 60 Millionen an, wohl wissend, daß diese Zahl durchaus höher, kaum aber niedriger liegen wird. Dabei sollten wir uns auch der alten Prognoseregeln bewußt bleiben: es ist allemal besser, die Bevölkerungs- und damit die Bedarfsentwicklung zu hoch als zu niedrig einzuschätzen. Mit einem Überschuß läßt sich besser leben als mit einem Mangel.

[7] Die für das Gebiet der DDR angesetzten Kennzahlen zur Entwicklung der Energiewirtschaft beruhen auf jüngsten Erwartungen, in welche die Entwicklung der Einwohnerzahl nur am Rande eingeht. Eine präzise Voraussage der Entwicklung der Bevölkerung des Gebietes der DDR ist nicht erforderlich. Dies gilt allerdings nicht für die Entwicklung des Verkehrs. Wir setzen auf eine Konstanz der Einwohnerzahl und damit auf 16 Millionen.

Damit ergibt sich das folgende Gesamtbild der mittelfristigen Entwicklung der Bevölkerungszahl Deutschlands:

Bundesgebiet:	gegenwärtig 62,5 Mio.	in 2005	65 Mio.
DDR-Gebiet:	gegenwärtig <u>16,0 Mio.</u>	in 2005	<u>16 Mio.</u>
Deutschland:	gegenwärtig 78,5 Mio.	in 2005	81 Mio.

[8] In diesem Zusammenhang sei bemerkt: Bei ihren 1980 ausgesprochenen energiepolitischen Empfehlungen ging die (erste) Enquete-Kommission „Zukünftige Kernenergie-Politik“ davon aus, daß im Jahr 2000 57 Millionen Einwohner auf dem Gebiet der Bundesrepublik wohnen werden (Abschließender Bericht dieser Kommission vom 27. 06. 1980, Bundestags-Drucksache 8/3241, S. 25). Gemäß DIW erwartet man gegenwärtig für eben dieses Jahr 65,7 Mio. Ein-

wohner, also 8,7 Mio. oder 15,3 % mehr. Es liegt auf der Hand, daß die nicht zuletzt auf diese Bevölkerungsentwicklung gestützten Erkenntnisse dieser Enquete-Kommission in Zweifel gezogen werden. Eine solche Fehleinschätzung sollten sich nicht wiederholen.

#### 4.2.4. Konsequenzen für den Energieverbrauch

[9] Nach den Untersuchungen des Kieler Instituts für Weltwirtschaft, des Berliner Instituts für Wirtschaftsforschung und des Münchener Ifo-Instituts für Wirtschaftsforschung werden von der Vereinigung der beiden Teile Deutschlands erhebliche Wachstumsimpulse ausgehen, die in höherem Wirtschaftswachstum, mehr Arbeitsplätzen und weniger Arbeitslosen – und letztlich auch in einem Energiemehrverbrauch – zum Ausdruck kommen. Die erwartete Erhöhung der Bevölkerungszahl führt zwar nicht zu einer linearen aber doch signifikanten Erhöhung des Sozialprodukts und des Energieverbrauchs.

Die InnoTec Systemanalyse hat in Gemeinschaft mit dem Institut für Weltwirtschaft an der Universität Kiel untersucht, wie sich nach Öffnung der Grenzen die Bevölkerungsentwicklung – Übersiedler, Aussiedler und Asylanten – auf den zukünftigen Energieverbrauch in Schleswig-Holstein auswirkt. In Verallgemeinerung der Ergebnisse dieser Untersuchung sind wir zu der Auffassung gelangt, daß eine durch Zuwanderung ausgelöste Erhöhung der Bevölkerungszahl um 1 % kurz und mittelfristig zu einer Erhöhung des Energieverbrauchs um 0,7 % führt.

[10] Konkret bedeutet dies: Die Differenz von 5 Millionen Einwohnern zwischen dem Referenzfall und der jüngsten Schätzung (8,3 %) entspricht einem Energie-Mehrverbrauch von größenordnungsmäßig 5,8 %: Im Falle des Reduktions-Szenarios „Energiepolitik“ wird der Primärenergieverbrauch im Jahre 2005 329,8 anstelle von 308,5 Mio. t SKE und werden – ceteris paribus – die Schadstoffemissionen 551 anstelle von 510 Mio. t CO<sub>2</sub> erreichen.

Diese zusätzlichen etwa 41 Mio. t CO<sub>2</sub> im Jahre 2005 müßten neben den im Szenario angesetzten 205 Mio. t CO<sub>2</sub>-Emissionen auch noch abgebaut werden, wenn das Reduktionsziel von annähernd 30 % bezogen auf den Emissionsstatus des Jahres 1987 verwirklicht werden soll.

[11] Die dieser Feststellung bisher entgegengehaltenen Argumente vermögen nicht zu überzeugen:

– Die Differenz ist erheblich.

– Es ist klar, daß Übersiedler aus der DDR in jenem Teil Deutschlands als Energieverbraucher und CO<sub>2</sub>-Emittenten nicht mehr zählen. Gleichwohl handelt es sich nicht um ein „Nullsummen-Spiel“: Die Studien erstrecken sich nur auf das Bundesgebiet. Wollte man die Abgrenzung zwischen den beiden Teilen Deutschlands im Sinne des von den Studiennehmern zitierten Nullsummenspiels zulassen, dann müßte man auch alle übrigen, durch die Vereinigung der beiden Teile Deutschlands sich ergebenden Veränderungen der Wirtschafts- und Energiedaten berücksichtigen.

- Übersiedler aus der DDR tragen zur Bevölkerungszunahme von 5 Millionen nur zu einem kleinen Teil bei. Wie die im Bericht „A-Gesamt“ zitierte Binnenwanderung zwischen der DDR und der Bundesrepublik von vier Millionen Personen zustande gekommen ist, kann nicht nachvollzogen werden. Tatsächlich haben insgesamt bislang etwa 650 000 Menschen den Weg von der DDR in die Bundesrepublik angetreten – zunächst als Übersiedler und seit Inkrafttreten des Staatsvertrages als gewöhnliche Wohnsitzwechsler. Der ganz überwiegende Teil der Differenz zwischen 60 und 65 Millionen Einwohnern hat mit der Öffnung der binnendeutschen Grenze nichts zu tun.

### 4.3 Verfügbarkeit als energiepolitische Vorgabe

[12] In Kapitel 2.3. war gefragt worden:

Müssen nicht gewachsene Energiestrukturen und daraus herzuleitende energiepolitische Handlungszwänge berücksichtigt werden?

[13] Zum Treibhauseffekt tragen überwiegend die bei der Verbrennung fossiler Energieträger unvermeidbaren CO<sub>2</sub>-Emissionen bei. *Abhilfe schafft allein eine starke Verringerung dieser Emissionen*, das heißt eine starke Verminderung der Verbrennung fossiler Energieträger, insbesondere von Kohle, Öl und Gas durch Energieeinsparung, Switch von CO<sub>2</sub>-intensiven auf CO<sub>2</sub>-schwache Energieträger sowie Substitution durch Erneuerbare und durch Kernenergie.

[14] Es sind solchermaßen weitgehende Reduktionen der CO<sub>2</sub>-Emissionen erforderlich, daß alle Reduktionsmöglichkeiten ausgeschöpft, d. h. alle geeigneten Wege – Verzicht, Rationalisierung und Substitution – beschränkt werden müssen. Die konkrete Verteilung der Lasten ist dann eine Frage der politischen Abwägung auf der Grundlage der zur Verfügung stehenden ökonomischen und ökologischen Daten.

Die Aufteilung der Reduktionsraten und -mengen auf die vier fossilen Energieträger sollte vorgenommen werden in Abwägung der folgenden für diese Energieträger unterschiedlich relevanten fünf Kriterien:

- 1) Der Grad der Versorgung aus heimischen Quellen als Maß für den Beitrag zur Versorgungssicherheit.

Sämtliche im abschließenden Studienbericht zitierten Szenarien sind mehr oder minder autark konzipiert. Sie tragen der durch die wachsende Welthandelsverflechtung und dem kommenden Europäischen Binnenmarkt geprägten Entwicklung zur Streuung der Versorgungsquellen kaum Rechnung und übersehen daher, daß die Versorgungssicherheit heute und in Zukunft breiter definiert und angelegt sein muß als dies in der Vergangenheit der Fall war.

- 2) Die Produktionskosten als Maß für die Preisgünstigkeit und die Wettbewerbsfähigkeit:

In den meisten Szenarien des Studienberichts „A-Gesamt“, insbesondere den Ausstiegsszenarien, wird den Unterschieden der Erzeugungs- und Umwandlungskosten der verschiedenen Energie-

träger nur ungenügende Aufmerksamkeit gewidmet. Das gleiche trifft zu für die nur unvollständig ermittelten Kosten einer Reduktion der CO<sub>2</sub>-Emissionen.

- 3) Die absehbaren sozialen und regionalen Auswirkungen von Produktionsverminderungen:

Auf dieses Kriterium wird unten eingegangen werden.

- 4) Die dem Energieträger zuzuordnenden Möglichkeiten einer Einschränkung des Verbrauchs oder einer Substitution von anderen oder durch andere Energieträger:

In den Szenarien ist dies das vorrangige Auswahl- und Bewertungskriterium, allerdings eingeschränkt durch die in den Vorgaben auferlegten Einschränkungen eines Switch zwischen den Energieträgern.

- 5) Die Umwelteffizienz (Brennwert-Nutzung), konkret der Mengen an CO<sub>2</sub>, die von dem Energieträger je Steinkohleneinheit emittiert wird (die auf das Joule oder auf die Tonne Steinkohleneinheiten bezogenen spezifischen CO<sub>2</sub>-Emissionen für Steinkohle, Braunkohle, Mineralöl und Erdgas verhalten sich zueinander wie 100 : 128 : 88 : 58).

Diesem Kriterium wird in den Szenarien voll Rechnung getragen.

[15] Zu Punkt (3) oben folgendes:

Die Szenarien sind sämtlich im Top-down-Vorgehen entwickelt worden: Sie ermitteln den – unerläßlichen – Endenergiebedarf und errechnen davon ausgehend dann rückschreitend den Bedarf an Umwandlungs- und Primärenergie. Eine Gegenrechnung im Bottom-up-Verfahren unterblieb.

Bei diesem verkürzten Vorgehen kommt auch die Frage zu kurz, ob die auf diesem Wege errechneten Strukturen des Primärenergieeinsatzes und des Input und Output an Elektrizität auch zu vereinbaren sind mit den gesamtwirtschaftlichen, den außenwirtschaftlichen, den energiewirtschaftlichen, den regionalpolitischen und den sozialpolitischen Belangen auf diesen beiden Ebenen der Energiewirtschaft. Für die folgenden nachstehend abgehandelten Sektoren der Energiewirtschaft stellt sich diese Frage:

- die Steinkohleförderung
- die Braunkohleförderung in Westdeutschland
- die Erdgaseinfuhren
- die Stromverfügbarkeit
- den Stromaustausch
- die Kernenergie

### 4.4 Bedarf und Verfügbarkeit von Primärenergie-Trägern

#### 4.4.1 Grundsätzliche Vorbemerkung

[16] Wir sind der Auffassung, daß es der Kommission nicht obliegt, grundlegenden energiepolitischen Wei-

chenstellungen vorzugreifen, die nicht klimarelevant sind. Das gilt insbesondere für die Frage, ob und in welchem Ausmaße im Bundesgebiet der Steinkohlebergbau und der Braunkohlenbergbau langfristig weiter betrieben werden soll, konkret, ob in der durch die Vereinigung der beiden Teile Deutschlands geschaffenen Lage einer der beiden westdeutschen Bergbauzweige zu Gunsten des anderen langfristig aufgegeben werden sollte.

[17] Die nachstehenden Überlegungen gehen davon aus, daß zur Deckung des Energiebedarfs des Bundesgebiets auch unter Berücksichtigung der gebotenen Reduktion der CO<sub>2</sub>-Emissionen langfristig sowohl Ruhrkohle als auch Braunkohle des rheinischen Reviers benötigt werden. Das präjudiziert weder die Aufrechterhaltung der beiden Bergbaue, noch die Aufteilung der Mengen auf die beiden Kohlenarten.

#### 4.4.2 Steinkohleförderung

[18] Inzwischen liegt das Gutachten der Mikat-Kommission vor, das sich in seinem Mehrheitsvotum für einen Jahresverbrauch heimischer Steinkohle von 55 Mio. t, davon 35 Mio. t zur Verstromung, und in seinem Minderheitsvotum für einen Jahresverbrauch heimischer Steinkohle von 35 bis 40 Mio. t, davon 25 Mio. t zur Verstromung, ausspricht. Wenn dem Mehrheits- oder dem Minderheitsvotum gefolgt wird, dann sind die Möglichkeiten eines Brennstoff-Switch „weg von der Steinkohle“ deutlich begrenzt.

[19] In den im endgültigen Bericht „A-Gesamt“ enthaltenen Szenarien finden sich die folgenden Kenndaten für den Verbrauch von Steinkohle im Jahre 2005:

Tabelle 2

**Steinkohleverbrauch im Bundesgebiet  
1987 und 2005**

Szenario	Petajoule	Mio. t SKE
Status 1987 <sup>1)</sup> . . . . .	2 215	75,5
„Status-quo“ 2005 . . . . .	1 883	64,2
„Hemmnisabbau“ 2005 . . . . .	1 490	50,9
„Energiepolitik“ 2005 . . . . .	1 155	39,4
„Ausstieg 2005“ für 2005 <sup>2)</sup> . . . . .	1 404	47,9
„Kernenergieausbau“ 2005 . . . . .	1 091	37,3

<sup>1)</sup> Arbeitsgemeinschaft Energiebilanzen

<sup>2)</sup> Keine Angaben im Bericht „A-Gesamt“ für „Ausstieg 1995“

Die Status-quo-Annahmen für Entwicklung der Förderung heimischer Steinkohle (35 + 20 Mio. t zuzüglich etwa 9 Mio. t Einfuhrkohle) liegen im Rahmen der Empfehlungen im Mehrheitsvotum der Mikat-Kommission. Alle Reduktions-Szenarien enden aber mit Verbrauchsmengen für Steinkohle, die die im Mehr-

heitsvotum dieser Kommission ausgewiesene Förderung nicht erreichen.

[20] In Übereinstimmung mit den Aussagen aller vier im Rahmen des Studienprogramms entwickelten Reduktions-Szenarien zur Reduktion der CO<sub>2</sub>-Emissionen votieren wir dafür, die heimische Steinkohleförderung bis zum Jahre 2005 auf ein Niveau zurückzuführen, das dem Minderheitsvotum der Mikat-Kommission – 35 bis 40 Mio. t p.a. – entspricht – dies unter dem Vorbehalt der Vorbemerkung 4.4.1.

Wir lassen uns dabei auch von folgender Überlegung leiten. Es wäre kaum zu rechtfertigen, den mitteldeutschen Braunkohlenbergbau, der gegenwärtig etwa ebenso viel Beschäftigte zählt, wie der westdeutsche Steinkohlenbergbau, in der Förderung um wenigstens 40 % zu reduzieren, den westdeutschen Steinkohlenbergbau aber unbehelligt zu lassen.

[21] Vorsorglich sei darauf hingewiesen, daß wenig Möglichkeiten bestehen, Steinkohle in die DDR zu liefern, um DDR-Braunkohle zu ersetzen. Im Gebiet der DDR werden neue Steinkohlekraftwerke sicherlich nicht im Absatzbereich der Ruhrkohle, sondern in Küstennähe auf Basis Einfuhrkohle oder im östlichen Teil auf Basis polnischer oder sowjetischer Kohle errichtet werden. Eine Beimengung heimischer Steinkohle zur DDR-Braunkohle stößt zudem auf technische und wirtschaftliche Schwierigkeiten.

#### 4.4.3 Braunkohleförderung im rheinischen Revier

[22] Die Szenarien im endgültigen Bericht „A-Gesamt“ enthalten die folgenden Kenndaten für den Verbrauch von Braunkohle im Jahre 2005:

Tabelle 3

**Braunkohleverbrauch im Bundesgebiet  
1987 und 2005**

Szenario Rohbraunkohle	Peta- joule	Mio. t SKE	Mio. t Braun- kohle
Status 1987 <sup>1)</sup> . . . . .	999	31,2	109,6
Status-quo 2005 . . . . .	771	26,3	92,3
Hemmnisabbau 2005 . . . . .	789	26,9	94,6
Energiepolitik 2005 . . . . .	630	21,5	75,5
Ausstieg 2005 für 2005 . . . . .	548	18,7	65,7
Kernenergieausbau 2005 . . . . .	452	15,4	54,2

<sup>1)</sup> Arbeitsgemeinschaft Energiebilanzen

[23] Um die Möglichkeiten eines Ausbaus, einer Beibehaltung oder einer Verringerung der Förderung von Braunkohle im Bundesgebiet beurteilen zu können, hier zunächst einige Informationen über die gegenwärtige Förderstruktur und die beabsichtigten Umstrukturierungen in dem mit Abstand größten westdeutschen Revier (Förderungsanteil über 95 %), dem rheinischen Braunkohlenrevier in der Verantwortung der Rheinbraun AG.

[23a] Rheinbraun verfügt ab 1995 nur noch über drei längerfristig weiterbestehende Tagebaue mit einer Jahresförderkapazität von 120 Mio. t Rohbraunkohle:

Tabelle 4

**Umrechnungstabelle für Braunkohle  
des Rheinischen Reviers**

	Giga- joule	t SKE	t BK <sup>1)</sup>	t CO <sub>2</sub>
1 GJ =	—	34,12	121,9 · 10 <sup>-3</sup>	91,78 · 10 <sup>-3</sup>
1 t SKE =	29,308	—	3,57	2,69
1 t BK <sup>1)</sup> =	8,211	0,280	—	0,910 <sup>2)</sup>
1 t CO <sub>2</sub> =	10,90	91,7	1,099	—

<sup>1)</sup> Rohbraunkohle

<sup>2)</sup> 1 t SKE in Form von Rohbraunkohle verursacht somit 3,25 t CO<sub>2</sub>-Emissionen

Die Vorkommen in diesen Feldern laufen zu einem Teil aus. Der rheinische Braunkohlebergbau kann auf Dauer nur weiterbetrieben werden, wenn ein neues Feld – Garzweiler II – aufgeschlossen wird. Dann können in diesem Tagebau auch fortentwickelte – übrigens auch voll wirtschaftliche – Kombikraftwerke mit einem den heutigen Status um 20 – 25 % übersteigenden Wirkungsgrad errichtet und betrieben werden.

Andererseits ist es wirtschaftlich nur sinnvoll, dieses neue Feld zu erschließen und abzubauen, wenn die Braunkohleförderung des ganzen Reviers mindestens 90 – 120 jato Rohbraunkohle oder 25,6 bis 31,3 jato SKE erreicht.

#### 4.4.4 Optionen einer Reduktion der CO<sub>2</sub>-Emissionen durch Verringerung des Verbrauchs heimischer Kohle im bisherigen Bundesgebiet

[24] Es besteht Übereinstimmung, daß eine Politik der Reduktion der CO<sub>2</sub>-Emissionen ein Zurückfahren der Kohleförderung und -nutzung im Bundesgebiet erfordert. In der gegebenen Lage bestehen drei Möglichkeiten:

1. Aufrechterhaltung einer Steinkohleförderung entsprechend dem Mehrheitsvotum der Mikat-Kom-

mission bei gleichzeitiger Reduktion der Braunkohleförderung unter 90 Mio. Jahrestonnen mit der Folge eines Verzichtes auf den Aufschluß des Feldes Garzweiler II, das heißt mit dem Ergebnis eines Auslaufens der Braunkohleförderung des rheinischen Braunkohlereviers.

2. Volle Aufrechterhaltung der Ausbaupläne für die Braunkohleförderung im rheinischen Revier mit der Folge einer Reduktion der Steinkohleförderung unter die im Minderheitsvotum der Mikat-Kommission bezeichnete Fördermenge.

3. Aufrechterhaltung der Steinkohleförderung auf der Grundlage des Minderheitsvotums der Mikat-Kommission und langfristige Fortführung der Braunkohleförderung des rheinischen Reviers durch Aufschließung des neuen Feldes Garzweiler II. Jeder dieser drei Wege hat seine Vor- und Nachteile in bezug auf Beschäftigung Kosten-, Subventionserfordernisse usw. sowie auch in bezug auf korrespondierende Maßnahmen im Gebiet der bisherigen DDR.<sup>1)</sup>

Einige Unterzeichner des Votums beschränken sich auf diese Feststellung.

[25] Die Mehrzahl der Unterzeichner dieses Votums vertreten folgende Auffassung:

In Übereinstimmung mit der von den Bonner Koalitionsfraktionen vertretenen Linie stehen diese auf dem Standpunkt, daß sowohl unter der Zielsetzung einer möglichst preiswerten und sicheren als auch unter der Zielsetzung einer weitgehend diversifizierten Energieversorgung die Braunkohleförderung im rheinischen Revier auf Dauer weiterbetrieben wird und nicht auslaufen darf. Deshalb setzen sie sich für eine langfristig gesicherte Rohbraunkohleförderung von 90 bis 110 Mio. Jahrestonnen ein.

Für diese Politik spricht auch die Erwägung, es wäre politisch nicht zu rechtfertigen, den rheinischen Braunkohlebergbau durch Verweigerung oder Verweigerung des Aufschlusses des Feldes Garzweiler II abzuwürgen, und gleichzeitig den eindeutig minder leistungsfähigen mitteldeutschen Braunkohlenbergbau, wenn auch reduziert, weiterzubetreiben. Dabei sei auch daran erinnert, daß die mitteldeutsche Braunkohle wesentlich salzhaltiger ist als die rheinische.

<sup>1)</sup> Den Berechnungen aus welchen sich die Entwicklung des Energieverbrauchs und der Emissionen ergibt, liegt die dritte Option zugrunde.

## 4.4.5 Erdgasimporte

[26] Die Szenarien im endgültigen Bericht „A-Gesamt“ enthalten die folgenden Kenndaten für den Verbrauch von Erdgas im Jahre 2005:

Tabelle 5

Gasverbrauch im Bundesgebiet 1987 und 2005

Szenario	Petajoule	Mio. t SKE	Mrd. Nm <sup>3</sup>	1987 = 100 <sup>1)</sup>
Status nur Erdgas 1987 <sup>2) 3)</sup> .....	1 887	64,4	53,6	—
Status-quo 1987 .....	2 250	76,8	64,0	100,0
Status-quo 2005 .....	2 487	84,8	70,7	112,6
Hemmnisabbau 2005 .....	2 769	94,5	78,7	128,6
Energiepolitik 2005 .....	2 709	62,5	77,0	127,3
Ausstieg 2005 für 2005 .....	3 331	113,7	94,7	157,3
Ausstieg 1995 .....	2 906	99,2	82,6	1995: 134,8
Kernenergieausbau 2005 .....	2 670	89,0	75,9	122,3

Nm<sup>3</sup> = Normalkubikmeter (oberer Heizwert = 35,1691 MJ/Nm<sup>3</sup>)

1) Nur Erdgas: Es wird unterstellt, daß der Anteil anderer Gase am gesamten Gasverbrauch konstant 363 PJ p. a. ausmacht.

2) Arbeitsgemeinschaft Energiebilanzen: Erdgas erreichte 1987 einen Anteil von 76,9% am gesamten Gasaufkommen

3) Zum Erdgasaufkommen in 1987 tragen bei:

- die heimische Förderung mit 28%
- Einfuhren aus den Nordsee-Anrainerstaaten mit 42%
- Einfuhren aus der UdSSR mit 30%.

[27] In allen Reduktions-Szenarien erhöht sich der Verbrauch von Erdgas zwischen 1987 und 2005. Dies ist nicht verwunderlich, weil, verglichen mit anderen fossilen Energieträgern, Erdgas eine bemerkenswert niedrige spezifische CO<sub>2</sub>-Emission aufweist: Erdgas = 100 angesetzt, werden von der Steinkohle 165, von der Braunkohle 199 und vom Öl 163 Einheiten emittiert.

In den beiden Ausstiegs-Szenarien erhöht sich der Erdgasverbrauch noch wesentlich stärker:

- im Szenario Ausstieg 2005 um 57%,
- im Szenario Ausstieg 1995 allein zwischen 1990 und 1995 um 35%.

[28] Es ist zu fragen, ob Steigerungen der Erdgasimporte in dieser Dimension und in dieser Zeitspanne erreicht werden können. Dazu ist zu verweisen auf die Feststellung im Bericht „A-Gesamt“ (Abschnitt 3.4.1):

„Technisch ist ein Gesamtimportvolumen von 6 Exajoule p.a. (dies entspricht 205 Mio. t SKE oder 170 Mrd. Normalkubikmetern) bei optimaler und zeitgerechter Investitionsplanung und Vertragsgestaltung machbar. Die Exportregionen wären in diesem Fall vor allem die Sowjetunion, Nordafrika und der Nahe Osten. Diese Versorgungsstruktur würde selbstverständlich eine geopolitische und versorgungsstrategische Absicherung erfordern. Eine weltweit steigende Erdgasnachfrage, ggf. verstärkt durch Maßnahmen

zur CO<sub>2</sub>-Minderung, birgt allerdings die Gefahr von über den Gewinnungskostenanstieg hinausgehenden Preissteigerungen.“

[29] Diese Aussage des Berichts „A-Gesamt“ ist zu ergänzen durch die folgenden vier Feststellungen:

- 1) Obergrenze für die in den Szenarien geforderten Erhöhungen der Erdgasimporte ist nicht das mit sechs Exajoule bezifferte maximale Importvolumen, von dem übrigens bislang etwa ein Viertel in Anspruch genommen ist, sondern die kurz- und mittelfristig verfügbare Menge. Da alle Erdgasimportverträge langfristig sind und regelmäßig eine take-or-pay-Klausel enthalten, die den Exporteur finanziell und risikomäßig absichert, sind mittelfristige und erst recht kurzfristige Erhöhungen der vertraglich vereinbarten Mengen nur im Tempo des Ausbaus der Förderung und des Leitungssystems erreichbar. Kurzfristige Heraufsetzungen sind praktisch unmöglich.
- 2) Die heraufziehende Besorgnis einer Klimaschädigung durch zuviel Verbrennung fossiler Energieträger verleitet viele Länder Westeuropas dazu, auf Erdgas zu setzen. Wie die aufschlußreichen Anhörungen schwedischer und dänischer Experten gezeigt haben, ist dieses Streben in Skandinavien besonders deutlich.
- 3) Die osteuropäischen Länder sind sämtlich im Umbruch. Sie müssen ihre Energiewirtschaft aus-

bauen, erneuern und sanieren, um den Energiebedarf zu decken und die Umweltbelastung zu mindern. Das Erdgas liefert dazu eine geradezu ideale Grundlage. Neben der auch in diesen Ländern nicht unbestrittenen Kernenergie ist Erdgas zudem die einzige weitgehend verfügbare CO<sub>2</sub>-günstige Alternative zu den dominierenden CO<sub>2</sub>-intensiven fossilen Energieträgern Stienkohle, Braunkohle und Öl. Die Nachfrage nach Erdgas wird daher steigen. Versorgungsengpässe sind nicht auszuschließen.

- 4) Die militärischen Auseinandersetzungen am Persischen Golf haben deutlich gemacht, daß eine extern ausgelöste Ölversorgungskrise nicht ausgeschlossen werden kann. Für den Fall einer Unterversorgung mit Öl sieht das IEA-Krisenmanagement, auf das weiter unten eingegangen wird, vor, daß der Ölverbrauch im Wege der Substitution durch andere Energieträger, nicht zuletzt durch Erdgas, verringert wird. Bei der Planung der Erdgasversorgung muß dem Rechnung getragen werden.

[30] Aus diesen Erkenntnissen leiten wir die folgenden drei Voten ab:

- 1) Wegen seiner vergleichsweise geringen Klimaschädlichkeit favorisieren wir eine Erhöhung des Anteiles des Erdgases an der Energieversorgung. Auf längere Sicht ist dies möglich und nötig. Auf kurze und mittlere Sicht muß den begrenzten Möglichkeiten einer Steigerung der Importmengen aber Rechnung getragen werden.
- 2) Wir halten die Steigerungsraten für die Erdgasimporte in den beiden Reduktions-Szenarien „Hemmnisabbau“ und „Energiepolitik“ und im Kernenergieausbau-Szenario noch für erreichbar und vertretbar. Die Steigerungsrate im Szenario „Ausstieg 2005“ wird nicht erreicht werden können. Vollends unrealistisch ist die kurzfristige Steigerungsrate im Szenario „Ausstieg 1995“.
- 3) Wir vertreten die Auffassung, daß die Energiepolitik darauf gerichtet sein soll, im Zuge der langfristigen Umstrukturierung den Verbrauch des begehrten klimagünstigen Energieträgers Erdgas auf Verwendungen zu orientieren, in welchen als Alternativen nur Klima-ungünstigere fossile Energien zur Verfügung stehen, insbesondere also auf die Versorgung des Wärmemarktes.

#### 4.4.6 Ölversorgung

[31] Nach dem in diesem Votum entwickelten Programm zur Reduktion der CO<sub>2</sub>-Emissionen in einem vereinten Deutschland wird sich der Mineralölverbrauch zwischen 1987/88 und 2005 von 162,5 Mio. t SKE um 37 % auf 103,1 Mio. t SKE verringern (der nicht energetische Verbrauch blieb außer Betracht). Das ist sehr viel und erfordert außerordentliche Anstrengungen vor allem in den Verwendungsbereichen Raumwärme und Verkehr.

[32] Bei diesen Vorschlägen zur Reduktion des Ölverbrauchs wird nicht berücksichtigt, daß politische Ereignisse die Ölversorgung gefährden können, wie dies durch die militärisch abgesicherte Besetzung Kuwaits durch den Irak am 02.08.1990 geschehen ist.

Für solche Fälle sehen die im Rahmen der internationalen Energie-Agentur (IEA) in Paris getroffenen Vereinbarungen, denen die Bundesrepublik Deutschland beigetreten ist, vor, daß solidarische Maßnahmen zur Verringerung des Ölverbrauchs eingeleitet werden. Auslöseschwelle für ein Ingangsetzen dieses Krisenmechanismus ist eine in einem Mitgliedstaat der IEA eingetretene Unterdeckung um 7 % des nach einer Referenzperiode bemessenen Bedarfs.

[33] Im Rahmen einer Politik zum Schutz der Erdatmosphäre muß sichergestellt sein, daß im Falle einer Ölversorgungskrise ausreichend Möglichkeiten bestehen, den Anforderungen des IEA-Krisenmechanismus zu genügen. Dieses Erfordernis hat in den letzten Wochen besondere Aktualität erlangt. Das hier vorgestellte Programm erkennt das an.

#### 4.5 Strombilanz und Stromverbund

[34] Zwei Hauptfragen stellen sich:

- ist auf der Grundlage der Reduktions-Szenarien zukünftig eine ausreichende Versorgung gewährleistet?
- ist es möglich, die für die Finanzierung der Investitionen erforderlichen Mittel aufzubringen?

##### 4.5.1 Wird die Versorgung mit Elektrizität gesichert sein?

[35] Die Szenarien im endgültigen Bericht „A-Gesamt“ enthalten die folgenden Angaben für die im Jahr 2005 erreichte Brutto-Stromerzeugung:

Tabelle 6

##### Brutto-Stromerzeugung im Jahre 2005 in TWh

Szenario	ohne KWK <sup>1)</sup>	KWK <sup>1)</sup>	insgesamt
Status 1987 <sup>1)</sup> . . . . .	358,8	59,4	417,3
Status-quo 2005 . . . . .	—	—	467,3
Hemmnisabbau 2005 . . . . .	345,3	111,5	456,8
Energiepolitik 2005 . . . . .	307,3	113,7	421,2
Ausstieg 2005 für 2005 <sup>2)</sup> . . . . .	248,7	121,2	379,9
Kernenergieausbau 2005 . . . . .	375,3	48,2	423,6

1) Kraft-Wärme-Kopplung zuzüglich industrielle Eigenerzeugung zur Eigennutzung (1987: 29,5 TWh)

2) Keine Angaben für das Szenario Ausstieg 1995

[36] Das Reduktions-Szenario geht praktisch von Stromautarkie aus. In der Tat war die Stromhandelsbilanz in den letzten Jahren weitgehend ausgeglichen. 1989 wurden 22 Mio. TWh eingeführt und 23 Mio. TWh ausgeführt.

[37] Die Szenarien verkennen die Lage, wenn sie davon ausgehen, daß dies auch in Zukunft so sein wird. Die zukünftige Entwicklung wird durch die folgenden Elemente gekennzeichnet:

- 1) Die Szenarien stellen den Mehrverbrauch nicht in Rechnung, der sich daraus ergibt, daß im Zieljahr der Projektionen, dem Jahr 2005, im Bundesgebiet nicht 60 sondern 65 Mio. Menschen leben werden. Verglichen mit der Rechnung, die sich auf 60 Mio. Einwohner stützt, wird der Energie-Mehrverbrauch mit 5.8 % veranschlagt (vergl. 4.2.4).
- 2) Mit der Vollendung des „Europäischen Binnenmarktes“ Ende 1992 wird es auch zu einem mehr oder minder integrierten Strommarkt kommen, der den Stromerzeugern anderer Mitgliedsstaaten den deutschen Markt schrittweise öffnen wird. Zumindest wird es Angebote von Seiten Frankreichs zur direkten oder – wohl mehr – indirekten Belieferung deutscher Stromkunden geben. Die deutsche Elektrizitätswirtschaft wird sich in ihren Investitionsplanungen hierauf einstellen müssen. Wenn sie massive Einfuhren französischen Stroms verhindern will, dann muß sie für ausreichendes Stromangebot zu wettbewerbsgerechten Preisen sorgen.

Hier ist der Hinweis von Interesse, daß Italien im Zuge seines Verzichtes auf Kernenergie inzwischen (1989) 34 TWh Strom importiert und damit etwa 15 % seines Bedarfs deckt.

- 3) Mit der Öffnung der deutsch-deutschen Grenze wurden auch die Türen für den innerdeutschen Stromverbund aufgeschlossen. Zu Stromlieferungen vom Bundesgebiet in das Gebiet der DDR wird es zunächst noch Über Gleichrichterkupplungen kommen. Eine Abschätzung des Lieferumfangs ist noch nicht möglich, alles spricht aber dafür, daß im Saldo mehr Strom in Richtung West-Ost als in Richtung Ost-West fließen wird.
- 4) In den osteuropäischen Ländern zeichnet sich immer deutlicher ein aufziehender Notstand in der Stromversorgung ab, der im Endergebnis zu Stromlieferungen in das RGW-Stromverbundsystem „Frieden“ führen wird. Hier wird das vereinte Deutschland schon aus geographischen Gründen gefordert sein.

[38] Im Ergebnis sind wir der Auffassung, daß der vom westdeutschen EVU zu deckende Strombedarf, von welchem die Reduktions-Szenarien ausgehen, um etwa 10 % höher angesetzt werden sollte als dies geschehen ist. Von diesen 10 % sind 6 % auf die Fehlschätzung der Einwohnerzahl des Bundesgebiets in 2005 zurückzuführen. 4 % oder im Basisjahr 17 TWh p.a. des Stromverbrauchs im Bundesgebiet sind für Stromlieferungen in den anderen Teil Deutschlands und nach Osteuropa in Reserve zu halten. Die 17 TWh entsprechen 15 % des gegenwärtigen Stromverbrauchs im DDR-Gebiet 1987.

**4.5.2 Können die erforderlichen Mittel zur Finanzierung der Investitionen aufgebracht werden?**

[39] Die Szenarien im endgültigen Bericht „A-Gesamt“ nennen die folgenden Investitionssummen für die Zeit zwischen 1987 und 2005:

Tabelle 7

**Investitionssummen 1987 bis 2005 in Mrd. DM (1987)**

Szenario	total <sup>1)</sup>	davon KWK
Status-quo 2005 . . . . .	—	—
Hemmnisabbau 2005 ..	160	42,4
Energiepolitik 2005 . . . .	324	42,4
Ausstieg 2005 für 2005 .	504	57,0
Ausstieg 1995 für 1995 .	keine Angaben	
Kernenergieausbau 2005 . . . . .	keine Angaben <sup>2)</sup>	

1) ohne die Investitionen zur Substitution CO<sub>2</sub>-intensiver durch CO<sub>2</sub>-schwache Energieträger  
 2) aber Hinweis darauf, daß die Netto-Kosten im Saldo negativ sind: real minus 4 788 Mio DM p. a.

[40] In den beiden *Reduktions-Szenarien* „Hemmnisabbau“ und „Energiepolitik“ sind für die Zeit zwischen 1987 und 2005 die folgenden, der Energiewirtschaft (d. h. ohne die privaten Haushalte und den Kleinverbrauch) zuzuordnenden Investitionssummen ausgewiesen:

Tabelle 8

**Investitionssummen 1987 bis 2005 in Milliarden DM (1987) nach dem Reduktionsszenario „Energiepolitik“**

	Hemmnisabbau	Energiepolitik
KWK, HKW und Fernwärme .	42,4	42,4
Raffinerien . . . . .	1,1	0,9
Erneuerbare nicht Stromerzeugung . . . . .	15,9	79,2
Erneuerbare Stromerzeugung	9,5	20,7
Substitution durch Erdgas . . . .	k.A.	k.A.
insgesamt ohne die Substitution durch Erdgas . . . . .	68,9	143,2

KWK = Kraft-Wärme-Kopplung,  
 HKW = Heizkraftwerke  
 k.A. = keine Angaben

[41] Im Reduktions-Szenario „Ausstieg 2005“ sollen zwischen 1987 und 2005 die folgenden, im hier behandelten Zusammenhang relevanten Investitionsbeträge aufgebracht werden (Beträge in Mrd. DM (1987)):

– KWK, HWK und Fernwärme	57.0 Mrd. DM
– Neue Energien zur Stromerzeugung	38.7 Mrd. DM
– Substitution durch Erdgas in Kondensationskraftwerke	keine Angaben

Zur letzten Position die folgenden Angaben: Bis 2005 sollen Kondensationskraftwerke auf Erdgasbasis in Betrieb genommen werden, die jährlich 82,1 TWh Strom erzeugen. 1989 trugen Gaskraftwerke mit einer Gesamtleistung von 12 GWe zur Stromversorgung mit insgesamt 31,9 TWh bei. Um 82,1 GWh Strom zu erzeugen, wären bei gleichem Wirkungsgrad Gaskraftwerke mit einer Leistung von 30 GWe erforderlich. Wird ein Anlagenabschlußpreis in Höhe von 2000 DM/kW zugrunde gelegt, so würde die Errichtung einer solchen Leistung 60 Mrd. DM kosten. Selbst wenn sich ein Teil der Neubauten durch bessere Auslastung des bestehenden Kraftwerksparks erübrigen

sollte, bleibt es bei einer zehnstelligen Investitionssumme.

[42] Um eine Vorstellung der Größenordnungen der geforderten Investitionen zu vermitteln, sei darauf hingewiesen, daß die Investitionen neuer Ausrüstungen des Sektors „Energie- und Wasserwirtschaft und Bergbau“ in den letzten erfaßten Jahren 1982 bis 1987 stets zwischen 13 und 14 Mrd. DM gelegen haben (Jahresgutachten 1989/90 des Sachverständigenrats zur Begutachtung der gesamtwirtschaftlichen Entwicklung). Eine Extrapolation auf die Zeit 1987 bis 2005 ergibt in realer Rechnung etwa 250 Mrd. DM (1989).

[43] Die Angaben in den Studienprogrammen über die Investitionen sind dürftig. Daher ist es erforderlich, die Investitionsbeträge an Hand der durch die Szenarien zu erreichenden Strukturänderungen in der Elektrizitätswirtschaft zu analysieren. Die folgenden kritischen Anmerkungen sind angezeigt:

[44] Für die Zeit von 1987 bis 2005 errechnen sich aus den Szenarien im endgültigen Bericht „A-Gesamt“ die aus den Tabellen 9 und 10 folgende Erhöhungen oder Verringerungen der nach Einsatzenergien aufgegliederten Brutto-Stromerzeugung:

Tabelle 9

#### Änderungen der Brutto-Stromerzeugung zwischen 1987 und 2005 in TWh p.a.

Szenario	Steinkohle	Braunkohle	Öl	Gas	Wasser	nuklear	neue	KWK <sup>1)</sup>	Saldo
1987 (insgesamt 418,3) . . . . .	106,8	76,6	2,8	21,5	20,6	130,5	–	59,4	–
Hemmnisabbau . . . . .	–43,0	–10,9	–2,8	+ 9,3	+3,0	+ 29,5	+ 1,5	+52,1	+38,7
Energiepolitik . . . . .	–75,5	–26,5	–2,8	+14,9	+4,0	+ 29,5	+ 5,3	+54,3	+ 3,2
Ausstieg 2005 <sup>2)</sup> . . . . .	–42,7	–34,5	–2,8	+82,1	+5,5	–130,5	+12,7	+71,8	–38,4
Ausbau . . . . .	–60,4	–47,7	–2,8	+ 5,5	+2,9	+144,6	+ 1,4	–11,7	+31,8

<sup>1)</sup> Kraft-Wärme-Kopplung zuzüglich industrielle Eigenerzeugung zur Eigennutzung (1987: 29,5 TWh)

<sup>2)</sup> keine Angaben für das Szenario Ausstieg 1995

Tabelle 10

#### Summe der Umschichtungen in der Brutto-Stromerzeugung zwischen 1987 und 2005 gemessen in TWh p.a. (in Klammern: die Stilllegungen und Betriebsaufnahmen in % der Stromerzeugung in 1987)

Szenario	Stilllegungen	Betriebsaufnahmen	zusammen
Hemmnisabbau . . . . .	– 56,7 (13,6%)	+ 95,4 (22,8%)	152,1
Energiepolitik . . . . .	–104,8 (25,1%)	+108,0 (25,8%)	212,8
Ausstieg 2005 <sup>1)</sup> . . . . .	–210,5 (50,3%)	+172,1 (41,1%)	382,6
Ausbau . . . . .	–122,6 (29,3%)	+134,4 (32,1%)	277,0

<sup>1)</sup> Keine Angaben für das Szenario Ausstieg 1995



Diese Tabelle zeigt, daß bis zum Jahr 2005 vor allem aus Gründen des Umweltschutzes, hier vorrangig zur Verminderung der CO<sub>2</sub>-Emissionen, Kraftwerkskapazitäten stillgelegt und neu in Betrieb genommen werden, die bis zu 50 % der Bruttostromerzeugung des Jahres 2005 sichern. Nicht gerechnet sind alle Stilllegungen und Inbetriebnahmen im Rahmen der normalen Erneuerung des Kraftwerksparkes.

**[45]** Dieser zusätzliche Investitionsbedarf trifft zusammen mit den Investitionserfordernissen zur Erneuerung und Sanierung der *Elektrizitätswirtschaft im Gebiete der DDR*. Wie auch immer der „Stromvertrag“ gestaltet sein wird, die Mittel zur Finanzierung dieser Investitionen wird die westdeutsche Elektrizitätswirtschaft aufbringen müssen. Die Investitionssumme wird auf 30 bis 40 Mrd. DM veranschlagt (vgl. 3.5.2.).

Daraus sollte vorsichtig gefolgert werden: Solange im anderen Teil Deutschlands die Erneuerung und Sanierung der Stromerzeugung unter Einschluß ihrer

Primärenergiebasis noch im Gange ist, sollte im Bundesgebiet auf die vorzeitige Stilllegung von Stromerzeugungsanlagen mit dem Ergebnis einer Kapitalverrichtung tunlichst verzichtet werden.

**[46]** Die beiden Reduktions-Szenarien „Hemmnisabbau“ und „Energiepolitik“ gehen von den folgenden Annahmen aus („A-Gesamt“ Abschnitt 4.1.2):

Die Nutzung der Kraft-Wärme-Kopplung (KWK) in Industrie und Kleinverbrauch steigt um 70 % gegenüber 1987. Zugleich verdoppeln die fossil befeuerten Heizkraftwerke ihre Lieferung von Fern- und Nahwärme sowie Strom. Heizwerke sind bis 2005 durch Blockheizkraftwerke (BHKW) und Heizkraftwerke (HKW) zu ersetzen.

Läßt man die stets mitverrechnete industrielle Eigenenerzeugung zur Eigennutzung mit gleichbleibenden, der Lage in 1987 entsprechenden 29.5 TWh p.a. außer Ansatz, dann ergibt sich folgende *Entwicklung des Einsatzes von KWK und HKW*:

Tabelle 11

**Kraft-Wärme-Kopplungs-Anlagen und Heizkraftwerke in 2005**

	TWh	1987 = 100	Investitionen
Status .....	29,9	100	—
Hemmnisabbau .....	82,0	278	42,4 Mrd. DM
Energiepolitik .....	84,2	285	42,4 Mrd. DM
Ausstieg 2005 <sup>1)</sup> .....	101,7	345	57,0 Mrd. DM
Ausbau .....	18,2	62	—

<sup>1)</sup> keine Angaben für das Szenario Ausstieg 1995

**[47]** Im Bericht „A-Gesamt“ heißt es dazu (Abschnitt 4.1.2.2)

Die restliche Reduktion der CO<sub>2</sub>-Emissionen – im Reduktions-Szenario „Energiepolitik“ um 55 Mio. t CO<sub>2</sub> p.a. – ist durch verringerte Stromnachfrage, verstärkte KWK-Anwendung und die dadurch bedingte geringere Kondensations-Stromerzeugung auf Basis fossiler Energieträger begründet.

Anders ausgedrückt heißt dies: Setzt man von der oben genannten Reduktion der Emissionen um 55 Mio. t CO<sub>2</sub> p.a. die hier nicht zu beziffernde Reduktionsmenge ab, die auf verringerte Stromnachfrage zurückzuführen ist, dann verbleibt die Reduktion, die verstärkter KWK-Anwendung und dadurch bedingter geringerer Kondensations-Stromerzeugung auf Basis fossiler Energieträger zuzurechnen ist. Eine Investition von 57 Mrd. DM in der Kraft-Wärme-Kopplung erbringt somit eine Reduktion der CO<sub>2</sub>-Emissionen, die sicherlich geringer ist als 55 Mio. t p.a. Dies heißt: Zur Reduktion der Emissionen um eine Tonne CO<sub>2</sub> pro Jahr sind Investitionen erforderlich, die 1000 DM

übersteigen. Im Vergleich zu anderen Reduktionsmöglichkeiten ist dies recht viel.

**[48]** Die vorstehende Analyse führt zu den folgenden Feststellungen und Folgerungen:

- 1) Die in den Reduktions-Szenarien „Energiepolitik“ und – mehr noch – „Ausstieg 2005“ geforderten Investitionen übersteigen die Mittel, die von der Elektrizitätswirtschaft aufgebracht werden können. Diese Investitionen sollten reduziert oder wenigstens gestreckt werden, solange die Erneuerung und Sanierung der Stromerzeugung im Gebiet der DDR noch im Gange ist.
- 2) Das Programm „Ausbau der Kraft-Wärme-Kopplung und Bau von Heizkraftwerken“ sollte auf den Mittelbedarf und die Reduktionsfolgen hin überprüft werden. Bis dies geschehen ist, sollte das Programm nur dort anlaufen und vollzogen werden, wo eine Stilllegung vorhandener Strom- und Wärme-Versorgungs-Anlagen nicht erforderlich wird.

## 4.6 Kernenergie

### 4.6.1 Grundsatz

[49] Bei einem Energiebedarf, der weltweit allein aufgrund des Bevölkerungswachstums weiterhin ansteigen wird, müssen alle verantwortbaren Quellen zur Energiegewinnung genutzt werden. dazu gehört die Kernenergie. Diese Energie hat sich in der Bundesrepublik Deutschland als wirtschaftliche, sichere, umweltverträgliche, von externen politischen Einflüssen unabhängige und kostengünstige Energie erwiesen. Sie sichert letztlich fast 40 % unserer Stromversorgung.

### 4.6.2 Argumente und Gegenargumente

[50] Unsere Haltung zur Kernenergie wird durch die folgenden sechs Überlegungen bestimmt:

[51] *Erstens:* Zumal in ihrer weiterentwickelten Technik gewährleistet die Kernenergie ein Höchstmaß an Sicherheit. Absolute Sicherheit gibt es ebenso wenig, wie eine Energienutzung ohne Risiken. Jede Energiequelle hat ihre spezifischen Kosten und Risiken, aber auch ihre jeweiligen Vorteile.

[52] *Zweitens:* Entgegen anfänglichen Erwartungen zeichnet sich ab, daß unter den großen Industrieländern allein die Bundesrepublik eine Abschaltung ihres zur Stromversorgung wesentlich beitragenden Parks von Kernkraftwerken ernsthaft und mit Aussicht auf Erfolg erwägt. Ein solcher Ausstieg würde zur Stilllegung der im internationalen Vergleich hochgradig sicheren Kernkraftwerke führen. Steigen wir aus und bauen zugleich unsere östlichen und westlichen Nachbarländer die Kernenergie weiter aus, so wird sich die von Reaktorkatastrophen ausgehende Gefahr für das Bundesgebiet kaum verringern, vielleicht sogar vergrößern.

[53] *Drittens:* Bei einem Ausstieg ginge unsere technische Erfahrung auf dem Gebiete der Reaktorsicherheit für die internationale Zusammenarbeit verloren. Auf jeden Fall wären wir nicht mehr in der Lage, unsererseits die Reaktorsicherheit zu verbessern, unsere Erfahrungen weiterzugeben und bei Fragen der Reaktorsicherheit international mitzusprechen.

[54] *Viertens:* Kernenergie ist versorgungssicher. Ihr Produktionswert wird ganz überwiegend im Inland erbracht. Sie ist damit praktisch eine heimische Energie, zumal eine ausreichende Bevorratung mit Uran leicht möglich ist.

Die Vorräte an fossilen Energieträgern sind endlich. Nach heutiger Erkenntnis ist als derzeit wirtschaftlich einsetzbare Technik nur die Kernenergie in der Lage, diese Begrenzung zu überwinden. Bei einem Verzicht könnten wir ausschließlich auf die derzeit nur begrenzt einsatzfähigen erneuerbaren Energiequellen zurückgreifen.

[55] *Fünftens:* Ein Verzicht auf Kernenergie wird unsere Stromerzeugungskosten erhöhen und damit die internationale Wettbewerbsfähigkeit der strominten-

siven Industrie und deren Absatzmöglichkeiten beeinträchtigen mit Folgen für Beschäftigung und Wirtschaftswachstum.

Das Strompreinsniveau in Frankreich ist gegenwärtig schon signifikant niedriger als in Deutschland. Verzichtet die Bundesrepublik auf Kernenergie, dann gibt es auch kein Mittel, um zu verhindern, daß die entstehende Versorgungslücke durch dann preislich noch weit vorteilhaftere Stromeinfuhren aus Frankreich geschlossen wird.

[56] *Sechstens:* Vermehrte Stromerzeugung aus fossilen Energieträgern anstelle von Kernenergie hat zur Folge, daß sich die Maßnahmen zur Verringerung der Belastung mit klassischen Luftschadstoffen erheblich verzögern.

### 4.6.3 Kernenergie und CO<sub>2</sub>

[57] Die Kernenergie kann nicht allein die Lösung des Klimaproblems sein. Es gibt aber keine Lösung ohne Kernenergie, solange eine umweltverträgliche Alternative nicht verfügbar ist.

[58] Die Auseinandersetzungen um die Klimafolgen der stetigen Anreicherung von CO<sub>2</sub> in der Atmosphäre werden, dessen sind wir sicher, zu der Entscheidung führen, die Verbrennung von fossilen Brennstoffen weltweit deutlich zu reduzieren. Verzichten wir auf Kernenergie, so stünde diese Energie auch nicht mehr zur Verfügung, um die so entstehende Versorgungslücke zu schließen.

[59] Schon heute sorgt die Kernenergie für eine Begrenzung der CO<sub>2</sub>-Emissionen. Bei einem Ersatz dieser Energie durch herkömmliche Brennstoffe, vorrangig Steinkohle, würden sich die gegenwärtigen

– globalen Gesamt-Emissionen in Höhe von jährlich rd. 20 Mrd. t CO<sub>2</sub> und etwa 2.0 Mrd. t CO<sub>2</sub>, d. h. um, 10 % und

– die Emissionen aus Quellen im Bundesgebiet in Höhe von jährlich rd. 750 Mio. t CO<sub>2</sub> um etwa 133 Mio. t CO<sub>2</sub>, d. h. von 18 %

erhöhen.

### 4.6.4 Die Ausstiegs-Szenarien

[60] Es existiert kein auch nur ansatzweise realisierbares Szenario für einen Verzicht auf Kernenergie bei gleichzeitiger Reduktion der CO<sub>2</sub>-Emissionen in einem Ausmaße, das – solidarisch mit der übrigen Welt – von unserem Land erwartet werden muß. Diese These demonstrieren die im Rahmen der Studien erarbeiteten beiden Szenarien „Ausstieg 2005“ und „Ausstieg 1995“.

[61] Das für das Bundesgebiet konzipierte Szenario „Ausstieg 2005“, dessen entscheidende Annahmen unter 2.2.1.4 aufgezählt sind, ist gekennzeichnet durch die aus den Tabellen 12 und 13 abzulesenden Veränderungen des Endenergie- und des Primärenergieverbrauchs zwischen 1987 und 2005 (vergl. den Bericht „A-Gesamt“, Abschnitte 4.1.3.2):

Tabelle 12

**Entwicklung des nach Verbrauchergruppen aufgliederten Endenergieverbrauchs  
in Szenario „Ausstieg 2005“**

Endenergie	1987		2005		+/- v. H.
	PJ	Mio. t SKE	PJ	Mio. t SKE	
Private Haushalte .....	2 034	69,4	937	32,0	-54,0
Kleinverbraucher .....	1 225	41,8	691	23,6	-44,0
Industrie .....	2 289	78,1	2 255	77,0	- 1,5
Verkehr .....	1 991	68,0	1 690	57,7	-15,1
nicht behandelt .....	123	4,2	108	3,7	-12,1
<b>Summe Endenergie .....</b>	<b>7 661</b>	<b>261,5</b>	<b>5 680</b>	<b>193,9</b>	<b>-25,9</b>

Tabelle 13

**Entwicklung des Primärenergieverbrauchs im Szenario „Ausstieg 2005“**

Primärenergie	1987		2005		+/- v. H.
	PJ	Mio. t SKE	PJ	Mio. t SKE	
Steinkohle .....	1 878	64,4	1 404	47,9	- 25,2
Braunkohle .....	1 016	34,7	548	18,4	- 46,1
Mineralöl .....	4 060	138,6	1 857	63,4	- 54,3
Gase .....	2 250	76,6	3 331	116,5	+ 48,0
fossile Energien .....	9 204	314,1	7 140	243,7	- 22,4
Wasserkraft .....	184	6,3	215	7,7	+ 17,1
Kernenergie .....	1 233	42,1	0	0	-100,0
neue Erneuerbare .....	0	0	104	3,5	-
sonstige Erneuerbare <sup>1)</sup> .....	135	4,6	740	25,3	+448,1
<b>Summe<sup>2)</sup> .....</b>	<b>10 791</b>	<b>368,3</b>	<b>8 232</b>	<b>281,0</b>	<b>- 23,7</b>

<sup>1)</sup> insbesondere Kraft-Wärme-Kopplung

<sup>2)</sup> inklusive des nicht angegebenen Stromimportaldos

**[62]** Das Szenario „Ausstieg 2005“ führt zu einer Reduktion der CO<sub>2</sub>-Emissionen um 28,7 % (205 Mio. t CO<sub>2</sub> p.a.). In einem ersten Anlauf war es nur gelungen, bis zu einer Reduktion um 24,1 % zu gelangen. Die Nachbesserung führte dann aber zu dem oben bezeichneten gewünschten Ergebnis.

**[63]** Nach unserer Einschätzung wird die Verwirklichung dieses Szenarios aus den folgenden Gründen scheitern:

1) In seiner Logik ist das Szenario „Ausstieg 2005“ – so der Bericht „A-Gesamt“, Abschnitt 4.1.3.3 – kaum vereinbar mit den vergleichsweise moderaten Preiserhöhungen um immerhin 152 DM/t SKE des Energiepolitik-Szenarios (vgl. 2.2.1.3.). Es ist konzipiert für die weit stärkeren Preiserhöhungen des ursprünglich von den Studiennehmern noch vorgesehenen, dann wohl als nicht durchsetzbar

fallengelassenen Energiespar-Szenarios, das eine Preiserhöhung um etwa 440 DM/t SKE vorsieht (Vgl. 2.2.1.4).

2) Das Szenario „Ausstieg 2005“ ist darauf ausgerichtet, daß die Bevölkerung des Bundesgebiets bis zum Jahre 2005 von gegenwärtig 62,5 Mio. auf 60 Mio. Einwohner zurückgeht. Wir erwarten aber, daß die Bevölkerung sich bis zu diesem Jahre auf 65 Mio. Einwohner vermehrt, dies mit einem entsprechend erhöhten Energieverbrauch.

3) Nach dem Szenario „Ausstieg 2005“ soll der Endenergieverbrauch der privaten Haushalte zwischen 1987 und 2005 um 54 % gesenkt werden. Das könnte nur gelingen durch eine Einsparung von Energie für die Raumwärme, die nahe an das technisch mögliche Reduktionspotential heranreicht, wahrscheinlich sogar übersteigt (vgl. 2.2.1.4). Das ist vernünftigerweise nicht zu erreichen.

4) Das Szenario „Austieg 2005“ will den Erdgasverbrauch bis zum Jahr 2005 um 57 % steigern. Das wird nicht möglich sein. Die Erdgasimporte können in dieser Frist nicht in einem solchen Ausmaße erhöht werden, es sei denn Deutschland setzt sich über die vorrangigen Bedürfnisse anderer Länder in Ost und West zur Erhöhung ihres Erdgasverbrauchs hinweg (vgl. 4.4.3).

Uneingeschränkt gilt dies für das Szenario „Ausstieg 1995“, das allein zwischen 1990 und 1995 eine Steigerung der Erdgasimporte um 35 % fordert (vgl. 4.4.3).

5) Wie im Bericht „A-Gesamt“ festgestellt wird (Abschnitt 4.1.3.4) führt das Szenario „Ausstieg 1995“ zu einer solchen Verringerung der Stromerzeugungs-Kapazität des Bundesgebiets, daß es nicht mehr möglich wäre, die Höchstlast zu decken.

6) Das Szenario „Austieg 2005“ erfordert für die Zeit zwischen 1987 und 2005 Investitionen in Höhe von 504 Mrd. DM (Bericht „A-Gesamt“, Abschnitt 4.1.3.3). Hiervon fällt etwa die Hälfte in die Verantwortung der Energiewirtschaft. Nicht gerechnet sind dabei alle, gleichfalls in die Verantwortung der Energiewirtschaft fallenden Investitionen, die erforderlich sind um 4,4 mal so viel Erdgas wie 1987

jährlich zusätzlich 575 PJ = 20 Mio. t SKE = 16 Mrd. Nm<sup>3</sup> Gas

verstromen zu können.

Die Energie- und Wasserwirtschaft einschl. Bergbau setzt für Investitionen neuer „Ausrüstungen“ jährlich Mittel zwischen 13 und 14 Mrd. DM ein (Vgl. 4.5.1). es ist unrealistisch, zu erwarten oder zu verlangen, daß dieser Wirtschaftszweig bis 2005 Mittel in dieser Höhe zusätzlich aufbringt, zumal er ohnehin schon durch aufwendige Investitionen zur Erneuerung und Sanierung der Energiewirtschaft im Gebiet der DDR gefordert ist.

7) Das Szenario „Austieg 2005“ übersieht, daß die Öffnung der deutsch-deutschen Grenze und der Wandel in den osteuropäischen Ländern Stromlieferungen in diese Gebiete zur Folge haben wird (vgl. 4.5.1).

Im übrigen sei bemerkt, daß das Szenario „Austieg 2005“ eine Verringerung der Braunkohleförderung im rheinischen Revier verlangt, die eine langfristige Aufrechterhaltung des Bergbaus in diesem Revier nicht mehr sinnvoll macht (vgl. 4.4.2).

**[64]** Wie unter 2.2.1.4 im einzelnen ausgeführt ist, legte das Öko-Institut in letzter Minute auch noch ein von diesem Institut konzipiertes, hinsichtlich der zugrunde liegenden Annahmen, insbesondere hinsichtlich des Analyserasters mit den anderen Szenarien nicht kompatibles Szenario „Ausstieg aus der Atomenergie bis zum Jahr 1995“ vor.

Da dieses Szenario für den Nicht-Elektrizitäts-Bereich keinerlei Angaben über die zugrundegelegten Annahmen und über den Rechengang macht, kann es nicht nachvollzogen werden. Die Kritik muß sich daher auf Plausibilitätsüberlegungen beschränken:

1) Ungeachtet der Tatsache, daß in der Zeit bis 1995 die Stromerzeugung aus Gas auf das 4,2-fache und

die Stromerzeugung aus Öl auf das 9,7-fache erhöht werden soll, erwartet das Szenario bis zu diesem Zeitpunkt eine Verringerung des Ölverbrauchs um 12 % und eine Verringerung des Gasverbrauchs um 10 %.

2) Allein bis 1995 soll der Energieverbrauch der vier Verbrauchergruppen wie folgt verringert werden:

– Haushalte um 18,3 %

– Kleinverbrauch um 22,1 %

– Industrie um 7,1 %

– Verkehr um 34,2 %

3) Gemäß Öko-Szenario sollen 1995 im Verkehrsbe- reich 45 Mio t SKE und 2005 nur noch 35 Mio t SKE verbraucht werden. Demgegenüber rechnen die Szenarien des Studienprogramms „A-Gesamt“ mit folgenden Energieverbräuchen im Verkehrsbe- reich im Jahre 2005:

– Szenario „Energiepolitik“ 69 t SKE

– Szenario „Ausstieg 2005“ 58 t SKE

Anders ausgedrückt: Das Öko-Szenario will bis 1995 den Energieverbrauch des Verkehrs auf ein um 23 % niedrigeres Niveau absenken, als das von den Koordinatoren abgesegnete Szenario „Ausstieg 2005“ zehn Jahre später für möglich gehalten wird.

Ohne irgendeinen rechtfertigenden Hinweis fällt es schwer, dies zu glauben. Das gibt uns Anlaß, auf die folgende Lebensregel hinzuweisen:

Der Bewohner eines Hauses wird kaum bereit sein, verbindlich und nicht widerrufbar zu entscheiden, daß dieses Haus binnen einer kurzen Frist abgerissen wird, wenn er berechtigte Zweifel hat, daß er bis zum Abrißtermin eine neue Bleibe findet.

#### 4.6.5 Schlußfolgerungen

**[65]** Wir leiten aus diesen Argumenten die Erkenntnis ab: Unter den in den Reduktions-Szenarien angenommenen – und auch allen einigermaßen vertretbaren – Bedingungen ist es offenbar nicht möglich, die CO<sub>2</sub>-Emissionen ausreichend zu reduzieren und gleichzeitig aus der Kernenergie auszusteigen. Auch durch Meinungsumfragen fühlen wir uns in dieser These bestätigt.

Auf der anderen Seite besteht im gegenwärtigen Zeitpunkt kein absehbarer Bedarf, den Bau weiterer Kernkraftwerke in Angriff zu nehmen.

In Abwägung dieser beiden Gründe sind wir für die folgende Orientierung der Kernpolitik.

**[66]** Sofern im Einzelfall nicht sicherheitstechnische Bedenken entgegenstehen, sollen die in Betrieb befindlichen Kernkraftwerke am Netz und deren Standorte erhalten bleiben.

**[67]** Über den Zubau von Kernkraftwerken – möglichst nach einem fortentwickelten LWR- oder auch HTR-Konzept – soll erst nach sorgfältiger Prüfung

der folgenden energie- und umweltpolitischen Erfordernisse entschieden werden:

- Strombedarfsentwicklung,
- Möglichkeiten einer Stromeinsparung,
- Sicherstellung der Kohlenutzung in wenn auch reduziertem Umfang,
- Verringerung der Schadstoff- und CO<sub>2</sub>-Emissionen,
- Kosten und Wettbewerbsfähigkeit der deutschen Stromerzeugung im Vergleich zum Stromangebot aus anderen EG-Ländern
- Stromlieferungen in die neuen Bundesländer.

Unverzögerlicher Handlungsbedarf besteht ohnehin nicht.

#### 4.6.6 Weitere Zukunft der Kernenergie

[68] Der Weiterbetrieb von Kernkraftwerken heißt nicht, daß wir auf andere Energien und auf Energie sparen verzichten müßten oder verzichten wollen.

Wir fordern, daß für den weiteren Betrieb von Kernenergieanlagen und für die weitere Entwicklung der Kernenergie sechs Leitsätze bestimmend sein sollen:

[69] *Erstens:* Die Vorsorge zum Schutz der Erdatmosphäre könnte – einige Mitglieder meinen: wird – zu einer Neubewertung der Kernenergie und damit zu einem Ausbau des Kernenergiepotentials führen.

[70] *Zweitens:* Die Sicherheit der Kernenergieanlagen muß auch in Zukunft gewährleistet sein. Zu diesem Zwecke sollte die Reaktorsicherheit weiterentwickelt und vervollkommen werden. Die Bundesregierung sollte sich zugleich um eine Intensivierung internationaler Bemühungen zur Verbesserung der Reaktorsicherheit mit dem Ziele einer internationalen Vereinbarung über Sicherheitsstandards bemühen. Im Rahmen dieser Initiative sind die in der Bundesrepublik gewonnenen Erkenntnisse über sicherheitstechnische Notwendigkeiten beim Bau und Betrieb von Kernkraftwerken in die Gespräche einzubringen.

[71] *Drittens:* Forschungs- und technologiepolitisch und aus Gründen der Reaktorsicherheit halten wir es für erforderlich, die Leichtwasserreaktor-Technologie weiterzuentwickeln. An einen sorgfältig geplanten Zubau von Kernkraftwerken könnte dann gedacht werden, wenn abzusehen ist, daß der Strombedarf nicht mehr durch die reduzierte Verstromung fossiler Energieträger gedeckt werden kann und zugleich geboten erscheint, die Stromeinfuhren aus Frankreich in Grenzen zu halten.

[72] *Viertens:* Zur weiteren friedlichen Nutzung der Kernenergie muß die nukleare Entsorgung gesichert sein. Wir fordern daher die Erprobung und den Vollzug einer gesicherten Entsorgung vorrangig durch direkte Endlagerung.

In diesem Zusammenhang fordern wir auch, das Endlager für hochaktive Abfälle in Gorleben das für Abfälle mit geringerer Wärmeentwicklung in Konrad als bald zu genehmigen und dann zu bauen.

[73] *Fünftens:* Wegen der besonderen inhärenten Sicherheit und der Möglichkeit, Wärme hoher Temperatur auszukoppeln, ist die Technik des Hochtemperaturreaktors besonders zukunftsweisend. Ungeachtet des Rückschlages beim Anlaufen des THTR 300 in Schmehausen sollte diese Technik daher weiterentwickelt werden.

Das Genehmigungsverfahren für den Schnellen Brüter SNR 300 in Kalkar ist nach Recht und Gesetz zu Ende zu führen.

[74] *Sechstens:* Die Bundesregierung sollte sich für internationalen Verhandlungen mit dem Ziele einer Verminderung des Risikos einer Verbreitung von Kernwaffen einsetzen.

#### 4.7 Revidierte Vorstellungen über die Entwicklung des Energieverbrauchs und der Emissionen

[75] Aufgrund der Überlegungen in diesem Kapitel 4 gelangt man für das Vereinte Deutschland zu konkreten Vorstellungen über die Möglichkeiten einer Reduktion der CO<sub>2</sub>-Emissionen bis zum Jahre 2005. Dieses Reduktions-Szenario geht von folgenden drei Annahmen aus:

- 1) der Energieverbrauch und die CO<sub>2</sub>-Emissionen verringern sich in beiden Teilen Deutschlands nach den Kriterien des Reduktions-Szenarios „Energie-Politik“; für das Gebiet der DDR wird auf Kapitel 3 verwiesen;
- 2) die Bevölkerung des Bundesgebiets erreicht im Zieljahr 2005 65 Millionen; des DDR-Gebiets 16 Millionen Menschen;
- 3) die energiepolitischen Handlungszwänge für die Förderung des westdeutschen Steinkohlenbergbaus und des rheinischen Braunkohlenbergbaus werden ebenso berücksichtigt, wie die Grenzen einer Steigerung der Erdgaseinfuhren und die gestiegenen Ansprüche an die Stromversorgung.

[76] Auf diesen Grundlagen ergeben sich die aus den folgenden *Tabellen 14-16* abzulesenden Entwicklungen des Energieverbrauchs und der CO<sub>2</sub>-Emission.

Tabelle 14

**Primärenergieverbrauch im Jahre 2005 in Mio. t SKE nach den Kriterien des  
Reduktionsszenarios „Energiepolitik“**

Annahmen: 65 Mio. Einwohner im Bundesgebiet und Anerkennung der energiepolitischen  
Handlungszwänge für die Förderung bzw. den Einsatz von Stein- und Braunkohle  
und die Erdgaseinfuhren

Für das Gebiet der DDR als Versuch einer Aufteilung

	DDR-Gebiet *)		Bundesgebiet *)		Deutschland	
	Mio. t SKE	%	Mio. t SKE	%	Mio. t SKE	%
Steinkohle .....	10	11,6 %	39,5 <sup>1)</sup>	12,1 %	49,5	12,0 %
Braunkohle .....	48,5	56,0 %	30 <sup>1)</sup>	9,2 %	78,5	19,0 %
feste Brennstoffe .....	58,5	67,6 %	69,5 <sup>1)</sup>	21,3 %	128	31,0 %
Mineralöl .....	16	18,5 %	87	26,6 %	103	24,9 %
Erdgas .....	9	10,4 %	102,5	31,3 %	111,5	27,0 %
Kohlenwasserstoffe .....	25	28,9 %	189,5	57,9 %	214,5	51,9 %
fossile Brennstoffe .....	83,5	96,5 %	259	79,2 %	342,5	82,9 %
sonstige Energieträger .....	3	3,5 %	68	20,5 %	71	17,1 %
insgesamt .....	86,5	100 %	327	100 %	413,5	100 %
Anteile .....	20,9 %		79,1 %		100 %	

\*) Wie bis zum 3. Oktober 1990

<sup>1)</sup> vgl. die Vorbemerkung zu Kap. 4

Tabelle 15

**Emissionen im Jahre 2005 in Mio. t CO<sub>2</sub>  
nach den Kriterien des Reduktionsszenarios „Energiepolitik“**

Annahmen: 65 Mio. Einwohner im Bundesgebiet und Anerkennung der energiepolitischen Handlungszwänge  
für die Förderung bzw. den Einsatz von Stein- und Braunkohle und die Erdgaseinfuhren

Für das Gebiet der DDR als Versuch einer Aufteilung

	DDR-Gebiet *)		Bundesgebiet *)		Deutschland	
	Mio. t CO <sub>2</sub>	%	Mio. t CO <sub>2</sub>	%	Mio. t CO <sub>2</sub>	%
Steinkohle .....	27	12,0 %	106	18,6 %	133	16,8 %
Braunkohle .....	151	67,1 %	98	17,3 %	249	31,4 %
feste Brennstoffe .....	178	79,1 %	204	35,9 %	382	48,1 %
Mineralöl .....	32	14,2 %	198	34,8 %	230	29,0 %
Erdgas .....	15	6,7 %	167	29,3 %	182	22,9 %
Kohlenwasserstoffe .....	47	20,9 %	365	64,1 %	412	51,9 %
insgesamt .....	225	100 %	569	100 %	794	100 %
Anteile .....	28,3 %		71,7 %		100 %	

\*) Wie bis zum 3. Oktober 1990

Tabelle 16

**CO<sub>2</sub>-Emissionen 1987/88 und 2005 in Mio. t  
Entwicklung nach den Kriterien des Reduktionsszenarios „Energiepolitik“**

Annahmen: 65 Mio. Einwohner im Bundesgebiet und Anerkennung der energiepolitischen Handlungszwänge für die Förderung bzw. den Einsatz von Stein- und Braunkohle und die Erdgaseinführen

Für das Gebiet der DDR als Versuch einer Aufteilung

	DDR-Gebiet *)		Bundesgebiet *)		Deutschland		
	1988	2005	1987/88	2005	1987/88	2005	1987/8 = 100
Steinkohle .....	12,9	27	201,5 <sup>1)</sup>	106	214,4	133	62,0
Braunkohle .....	259,3	151	107,7 <sup>1)</sup>	98	362,0	249	68,7
Mineralöl .....	38,8	32	331,7	198	370,5	230	62,1
Erdgas .....	20,2	15	103,3	167	123,5	182	147,4
insgesamt .....	321,2	225	739,2	569	1 070,4	794	74,2
1987/88 = 100 .....	100	70,0	100	77,0	100		74,2

\*) Wie bis zum 3. Oktober 1990

<sup>1)</sup> Vgl. die Vorbemerkung zu Kapitel 4

[77] Aus diesen Tabellen lassen sich die folgenden Erkenntnisse ableiten:

1) Unter der Bezeichnung Voraussetzungen gelingt es, den Energieverbrauch und die CO<sub>2</sub>-Emissionen bis zum Jahre 2005 wie folgt zu vermindern (Tabelle 17):

Tabelle 17

**Verringerung des Energieverbrauchs  
und der CO<sub>2</sub>-Emissionen  
1987/88 bis 2005**

	Primärenergieverbrauch	CO <sub>2</sub> -Emissionen
Bundesgebiet ...	um 18,0 %	um 23,0 %
DDR-Gebiet ....	um 30,4 %	um 30,0 %
Deutschland ....	um 19,6 %	um 25,8 %

Dieser Vergleich verdeutlicht die spezifisch größeren Reduktionsmöglichkeiten im DDR-Gebiet

2) Für das Bundesgebiet greifen wir der Entscheidung „wieviel Steinkohle; wieviel Braunkohle?“ im einzelnen nicht vor. In der dadurch eingegrenzten Differenzierung verändern sich die Anteile der verschiedenen Primärenergien bis 2005 wie folgt (Tabelle 18):

Tabelle 18

**Anteile der Primärenergieträger am Verbrauch und an den Emissionen**

Primärenergie	Verbrauchsanteile		Emissionsanteile	
	1987/88	2005	1987/88	2005
Kohle .....	38,3 %	31,0 %	53,8 %	48,1 %
Mineralöl .....	35,1 %	24,9 %	34,6 %	29,0 %
Erdgas .....	14,8 %	27,0 %	11,6 %	22,9 %
Andere .....	11,8 %	17,1 %	—	—
	100 %	100 %	100 %	100 %

Dieser Vergleich läßt erkennen:

- Es findet eine Verbrauchsverlagerung weg von der Kohle und vom Mineralöl (minus 17,5 Prozentpunkte) und hin zum Erdgas und zu den „Anderen“ (plus 17,5 Prozentpunkte) statt. Ins Gewicht fällt vor allem die Reduktion des Verbrauchs von Braunkohle aus dem mitteldeutschen Vorkommen um 43 %. Der Verbrauch von Kohle aus den Vorkommen im Bundesgebiet geht um 35 % zurück. Der im Jahre 2005 verbleibende Verbrauch würde gestatten, im Bundesgebiet sowohl den Steinkohlebergbau als auch den Braunkohlenbergbau weiterzubetreiben.
- Nach wie vor werden die durch den Verbrauch von Kohle verursachten Emissionen dominieren. Der Anteil geht allerdings um 3,7 Prozentpunkte zurück. Auf der anderen Seite werden sich die spezifisch günstigen Emissionen aus dem Verbrauch von Erdgas fast verdoppeln.
- Bei dem Beitrag, den „andere“ Primärenergien zur Versorgung in 2005 leisten werden, ist zu berücksichtigen, das gemäß den Vorgaben für die Szenarien die Kernenergie nicht oder nur begrenzt zur Deckung des Bedarfs im anderen Teil Deutschlands beitragen wird. Dies begründet nicht unwesentlich den Unterschied in der Versorgungsstruktur zwischen West und Ost.

**[78]** Das größenordnungsmäßig mit etwa 30 % vorgegebene Reduktionsziel wird im Bundesgebiet mit 23,0 % verfehlt und im DDR-Gebiet mit 30,4 % leicht überschritten. Für das Vereinte Deutschland errechnen sich 25,8 %.

Dabei bleibt aber unberücksichtigt, daß die Reduktion nicht unwesentlich höher ausfallen wird, wenn es zu einem in der Linie rationelleren Energienutzungen liegenden verstärkten Energieaustausch zwischen den beiden Teilen Deutschlands und auch einem stärkeren Energieaußenhandel sowohl im Rahmen der EG und mit der westlichen Welt, als auch mit den „Staatshandelsländern“ kommen wird.

Dieses in den Szenario-Rechnungen nicht berücksichtigte Potential rechtfertigt die Erwartung einer Reduktion der CO<sub>2</sub>-Emissionen im vereinten Deutschland bis zum Jahre 2005 um 25 bis 30 %, wahrscheinlich wohl 30 %.

## 4.8 Vorgehen bei der Reduktion der CO<sub>2</sub>-Emissionen und Instrumente zur Erreichung dieses Zieles

### 4.8.1 Probleme und Fragen

**[79]** Regelungen und Maßnahmen, um binnen 15 Jahren eine Reduktion der CO<sub>2</sub>-Emissionen um 25 bis 30 % zu gelangen, müssen vielseitig sein und tief greifen. Wenn irgend möglich sollten sie sich auf alle Energieträger auf den Ebenen der Erzeugung, Umwandlung und Nutzung erstrecken und sie sollten sich aller geeigneter Interventions-Instrumente unvoreingenommen bedienen. Hierzu wird auf Abschnitt 2.4 verwiesen.

**[80]** Nach Analyse der Ergebnisse der Studien, Klärung der Rahmenbedingungen für eine CO<sub>2</sub>-Minderungs politik und Identifizierung der Optionen einer solchen Politik, ist es nun möglich und zugleich erforderlich, die Vorgehensweise konkreter festzulegen. Die folgenden Fragen werden behandelt:

- wie können mengenwirksame Regelungen und Maßnahmen wirksam angesetzt werden (s. 4.8.2);
- wie ist eine CO<sub>2</sub>- oder Energie-Abgabe oder -Steuer zu beurteilen (s. 4.8.3);
- welches sind Möglichkeiten und Grenzen preis- und kosten-beeinflussender Eingriffe im Rahmen der EG (s. 4.8.4);
- sollte nicht schrittweise vorgegangen werden (s. 4.8.5);
- wäre eine gewisse Flexibilität bei der Erreichung der CO<sub>2</sub>-Minderungsziele nicht angezeigt (s. 4.8.6);
- wie sind die in den Studienberichten unter dem Stichwort „Hemmnisabbau“ aufgezählten sektorspezifischen Maßnahmen zu beurteilen (s. 4.8.7).

### 4.8.2 Mengenwirksame Instrumente

**[81]** Hoheitliche Beschränkungen der Förderung oder Verwendung von Steinkohle und Braunkohle sind Eingriffe, die sich zur Reduktion CO<sub>2</sub>-Emissionen in besonderem Maße eignen. Bei der Steinkohle wird dieses Ziel durch einen in jedem Fall EG-konformen Abbau von Subventionen erreicht werden. Für die Braunkohle sollte diese Beschränkung im Wege einer zwischen der Bundes- und Landesregierung NRW einerseits und dem rheinischen Braunkohlenbergbau andererseits möglichst einvernehmlich verabschiedeten Umstrukturierungsaktion vorgenommen werden.

### 4.8.3 Preis- und kostenbeeinflussende Maßnahmen (Steuern und Abgaben)

**[82]** Problematisch und umstritten ist in erster Linie, ob die Reduktion der CO<sub>2</sub>-Emission durch eine Steuer oder Abgabe, sei es nach Maßgabe der CO<sub>2</sub>-Emissionen, sei es entsprechend dem Gesamtverbrauch von Energie, erreicht werden soll. Hierzu die folgenden Hinweise.

**[83]** Eine Energiesteuer, d. h. eine Steuer, die alle Energien in gleicher Weise trifft, ist kein geeignetes Mittel zur Reduktion der CO<sub>2</sub>-Emissionen, denn sie pönalisiert – erwünschtermaßen – nicht nur die CO<sub>2</sub>-intensiven Energieträger, sondern – nicht erwünscht – auch die CO<sub>2</sub>-freien und CO<sub>2</sub>-schwachen und ist insoweit kontraproduktiv. Wir lehnen eine solche Steuer auch deshalb ab, weil keinerlei ausreichende Aussicht auf EG-weite Verwirklichung besteht.

**[84]** Geeignet als Mittel wäre dagegen eine CO<sub>2</sub>-Steuer oder -Abgabe. Dabei sollten wir uns aber zweier Dinge bewußt sein:



- Bis zur Einführung einer solchen Steuer oder Abgabe ist noch ein langer Weg.
- Wie auch immer, eine solche Steuer oder Abgabe wird allein keineswegs ausreichen, um die CO<sub>2</sub>-Emissionen ausreichend zu verringern, dies schon deshalb, weil eine solche Belastung an den variablen Kosten ansetzt, die viel stärker investitionsbestimmenden festen Kosten aber nicht berührt.

Wer hier und heute eine solche Steuer oder Abgabe als Mittel zu einer nachhaltigen Reduktion der CO<sub>2</sub>-Emissionen empfiehlt, ist unredlich.

#### 4.8.4 Vereinbarkeit mit den Regeln und Wettbewerbsbedingungen des Gemeinsamen Marktes

[85] Unter 2.4.3 wurde dargetan, daß eine Steuer oder Abgabe auf den Energieverbrauch oder die CO<sub>2</sub>-Emissionen mit den Regeln und Wettbewerbsbedingungen des Gemeinsamen Marktes kollidieren kann.

Wir sind der Meinung, diese Schwierigkeit könnte am einfachsten und zweckmäßigsten dadurch ausgeräumt werden, daß Empfehlungen der Enquete-Kommission zur Einführung solcher Steuern oder Abgaben mit dem Vorbehalt versehen werden „im Rahmen des EG-Rechts“. Das wäre redlich und realistisch.

#### 4.8.5. Schrittweises Vorgehen

[86] In den Auseinandersetzungen über ein Programm zur Reduktion der CO<sub>2</sub>-Emissionen ist wiederholt unterstrichen worden, es werde nicht möglich sein, die vorgesehenen Regelungen und Maßnahmen von einem Tag auf den anderen einzuführen. Verwiesen sei auf die Feststellungen zum Studienkomplex „E“.

Die Politik wird sich kaum entschließen können, in einem einmaligen Kraftakt über eine weltweite Gesamtktion zur ausreichenden Reduktion der CO<sub>2</sub>-Emissionen zu entscheiden. Ein alles oder nichts wird alles zum Scheitern bringen. Deshalb muß schrittweise vorgegangen werden, etwa in der Weise, daß – in voller Erkenntnis der Unzulänglichkeit – zunächst über eine Teilaktion mit kürzerer Fristsetzung entschieden wird, dem dann – mit Bestätigung der Erkenntnisse und zunehmender Bereitschaft der Öffentlichkeit – Entscheidungen über weitere Teilaktionen bis hin zur ausreichenden Vorsorge folgen müßten. Diese Vorgehensweise läßt zu, auch zurückzubleiben, falls dies nach bislang nicht erwarteten Erkenntnissen geboten sein sollte.

In dem hier vorgestellten Programm zur Verringerung der CO<sub>2</sub>-Emissionen folgen wir diesem Ansatz dadurch, daß wir eine Reihe von Regelungen und Maßnahmen nicht unverzüglich sondern verzögert in Kraft zu setzen empfehlen.

#### 4.8.6. Flexibilität bei der Zielverwirklichung

[87] Das Ziel einer Reduktion der CO<sub>2</sub>-Emissionen um 25 bzw. 30% sollte zwar als rigide Zielvorgabe

deklariert werden, nicht aber als rigide Vorgabe für Mittel und Wege, wie dieses Ziel verwirklicht werden kann, d. h. als absehbares Ergebnis der Gesamtheit der vorgeschlagenen Regelungen und Maßnahmen.

#### 4.8.7 Kriterien zur Wertung der sektorspezifischen Regelungen und Maßnahmen im Bericht zu den Studienkomplexen A1 bis A6

[88] Der Bericht „A-Gesamt“ enthält sechs Listen von Empfehlungen für sektorspezifische Regelungen und Maßnahmen, die im Rahmen der Reduktions-Szenarien „Hemmnisabbau“ und „Energiepolitik“ ergriffen werden sollen (S. 216 bis 222). In diesem hier vorgelegten energie- und umweltpolitischen Programm wird an der gegebenen Stelle zu diesen Empfehlungen Stellung genommen. Hier nur einige generelle Anmerkungen.

[89] Wir werden zu den einzelnen Vorschlägen folgende Voten verwenden:

uneingeschränkt Ja  
Ja unter Bedingungen  
Ja mit verzögertem Beginn  
zunächst prüfen  
Nein

[90] Bei den vorbezeichneten Voten werden wir uns von den folgenden Überlegungen leiten lassen:

- 1) Wir setzen uns nur ein für Regelungen und Maßnahmen, die eine angemessene Reduktion der CO<sub>2</sub>- oder anderen Luftschadstoff-Emissionen erwarten lassen. Keine Eingriffe um der Eingriffe willen!
- 2) Soweit Regelungen oder Maßnahmen bereits auf den Weg gebracht sind, erledigen sich die Vorschläge.
- 3) Verbesserungen des Informationsangebots und Beratungsempfehlungen sind bedenkenfrei.
- 4) Keine Eingriffe in die internen Strukturen von Verwaltungen, Unternehmen und Organisationen. Wir achten deren Autonomie!
- 5) Zurückhaltung bei Regelungen und Maßnahmen, die unternehmerische Initiativen abtöten oder einschränken.
- 6) Regelungen und Maßnahmen, die Wettbewerbsbeschränkungen und Wettbewerbsverfälschungen abbauen oder verringern, sind willkommen. Dies gilt vor allem für den Abbau von Subventionen.
- 7) Größte Zurückhaltung bei Eingriffen in die Wettbewerbsordnung.
- 8) Subventionen und Beihilfen sollten nicht auf Unternehmen oder Organisationen abgestellt werden, sondern ausschließlich auf Funktionen und konkrete Sachverhalte.
- 9) Zurückhaltung bei Regelungen und Maßnahmen, die in langfristige vertragliche Bindungen eingreifen, z. B. das Verhältnis Vermieter zu Mieter ändern.

10) Einer Dezentralisierung der leitungsgebundenen Energieversorgung wird nur insoweit das Wort geredet, als sie zu einer angemessenen Reduktion der CO<sub>2</sub>-Emissionen führt oder andere Umweltvorteile mit sich bringt.

## 5. Handlungsempfehlungen

### 5.0 Mittel und Wege

**[1]** Die Handlungsempfehlungen dieses Programms einer Vorsorge gegen Klimaschäden in einem vereinten Deutschland beschränken sich im wesentlichen auf kurz- und mittelfristige Regelungen und Maßnahmen, die bis zum Jahre 2005 wirksam werden. Längerfristige Aktionen werden nur angedeutet.

**[2]** Es gibt nur *fünf* Wege einer Verminderung der CO<sub>2</sub>-Emissionen. Gemeinsam ist diesen Wegen, daß auf CO<sub>2</sub>-intensive Prozesse entweder verzichtet wird oder daß diese Prozesse umgestellt werden auf CO<sub>2</sub>-schwache oder CO<sub>2</sub>-freie Prozesse. Die fünf Wege sind:

- Vermeiden*, d. h. ersatzloser Verzicht auf CO<sub>2</sub>-emittierende Prozesse (Energiesparen im engeren Sinne); dies ist der von gesellschaftskritischen Kreisen präferierte Weg.
- Rationalisieren*, d. h. Verbesserung des Wirkungsgrades der Energiegewinnung, -umwandlung und -nutzung. Auch nach letzthin bemerkenswerten Erfolgen, bestehen noch vielfältige Möglichkeiten.
- Umstellen*, d. h. Ersetzung CO<sub>2</sub>-intensiver durch CO<sub>2</sub>-schwache Prozesse. CO<sub>2</sub>-mindernde Umstellungen in der Energieerzeugung sind vor allem deshalb möglich, weil die Mengen an CO<sub>2</sub>, die, bezogen auf die erzeugte Energiemenge, bei der Verbrennung von Steinkohle, Braunkohle, Erdöl und Erdgas emittiert werden, sich zueinander verhalten wie 100:121:88:58

Eine Einbeziehung der mit der Erzeugung, dem Transport und der Nutzung von Kohle, Öl und Gas verbundenen Methan-Emissionen (CH<sub>4</sub> hat ein um den Faktor 32 größeres Treibhauspotential als CO<sub>2</sub>) hat keine Änderung der Rangordnung der Klimawirksamkeit der fossilen Energieträger zur Folge.

- Substituieren durch erneuerbare Energien*, vor allem Sonne einschl. Biomasse, Wind und Erdwärme.
- Substitution durch Kernenergie*.

**[3]** Die Reduktion der CO<sub>2</sub>-Emissionen kann auf verschiedenen energiewirtschaftlichen Ebenen bzw. in verschiedenen energiewirtschaftlichen Bereichen angesetzt werden. Diese Ebenen und Bereiche sind:

- Die Einfuhr von Primärenergie-Trägern (Kohle, Erdöl, Erdgas, Uran) und von Sekundärenergieträgern (Raffinerieprodukte, Elektrizität);
- die Erzeugung von Primärenergie-Trägern: Kohle, Rohöl, Erdgas, Wasserkraft, Sonnenenergie, Windenergie, Energie aus Biomasse usw.;

c) die Umwandlung von Primärenergie-Trägern in Endenergien (einschl. Switch von einem Energieträger auf einen anderen) hier vor allem die Erdölverarbeitung und die Strom- und Fernwärmeerzeugung, auch durch Kernkraftwerke.

d) die Wärmewirtschaft / der Wärmemarkt, hier im besonderen:

- der Niedertemperatur-Wärmemarkt, vor allem zur Deckung des Raumwärmebedarfs der privaten Haushalte und der Kleinverbraucher.
- der Hochtemperatur-Wärmemarkt, vor allem zur Deckung des Prozeßwärmebedarfs der Industrie und des Handwerks,

e) die Verkehrsstruktur / das Verkehrssystem.

**[4]** Die nachstehenden Empfehlungen für Regelungen und Maßnahmen zur Reduktion der CO<sub>2</sub>-Emissionen sind in ihren Dimensionen (Umfang, Eingriffstiefe, usw.) so zu verstehen, daß sie die in den vorangehenden Kapiteln bezeichneten Verringerungen und Umschichtungen des Energieeinsatzes und des Energieverbrauchs zu erreichen vermögen.

Wo dies angegeben ist, sollte schrittweise oder abhängig von der Erfüllung von Vorbedingungen vorgegangen werden, auch hier wird auf die vorangehenden Kapitel verwiesen.

**[5]** Alle nachstehend aufgeführten Empfehlungen beziehen sich auf das vereinte Deutschland. Wenn im Bundesgebiet und im Gebiet der DDR \*) unterschiedlich vorgegangen werden soll, wird dies gesagt.

Eines der wichtigsten Instrumente zur Reduktion der CO<sub>2</sub>-Emissionen ist eine Steuer oder Abgabe auf den Energieverbrauch oder nach Maßgabe der CO<sub>2</sub>-Emissionen. Wir haben uns für eine CO<sub>2</sub>-Abgabe entschieden. Im letzten Abschnitt dieses Kapitels werden die Modalitäten einer solchen Abgabe dargestellt.

## 5.1. Energieeinfuhren und innerdeutsche Energielieferungen

### 5.1.1 Einfuhren von Energie aus Drittländern

**[6]** Die Bundesregierung sollte die EG veranlassen:

- die Zollkontingentierung für die Einfuhr von Kohle aus Drittländern zunächst aufrechtzuerhalten. Im Zuge der Eingliederung der DDR werden zusätzliche Einfuhren von Steinkohle, vor allem aus Polen und der UdSSR, erforderlich werden. Dies wird Anlaß geben, die speziell auf die Bundesrepublik begrenzte, von der EG getragene Zollkontingentierung zu überprüfen. Dabei ist fraglich, ob es bei dem bisherigen System bleiben wird. Sollte es zu einer Umstellung des Kohlepennings auf ein System der Subventionierung der heimischen Steinkohle kommen, dann muß auch nach Möglichkeiten gesucht werden, die Zollkontingentierung überflüssig zu machen.

\*) „Bundesgebiet“ und „Gebiet der DDR“ beziehen sich auf die Rechtslage vor dem 3. Oktober 1990

– in den Gemeinsamen Zolltarif einen Zoll auf die Einfuhr von Rohöl und Mineralölproduktion aus Drittländern und – sobald hierüber positiv entschieden worden ist – auch einen Zoll auf die Einfuhr von Kohle und Erdgas aus Drittländern einzuführen.

[7] Wie dies bereits vorgesehen ist, sollte der Markt des Gebietes der DDR für Energieeinfuhren aus Drittländern weitgehend geöffnet werden. Die Einführung der Deutschen Mark hat hierfür die Voraussetzungen geschaffen. Zu denken ist nicht nur an Einfuhren von Kohle aus Polen und der UdSSR, sondern insbesondere auch an Einfuhren von Erdgas sowohl aus der UdSSR als auch aus dem Nordseeraum und an Einfuhren von Mineralöl aus der UdSSR und Ländern der westlichen Welt.

### 5.1.2 Innerdeutsche Energielieferungen

[8] Schon wegen des sich abzeichnenden Energie-notstands im Gebiet der DDR wird es zu Energie-, und hier vor allem Stromlieferungen aus dem Bundesgebiet in das Gebiet der DDR kommen. Diese Zulieferungen werden emissionsmindernd wirken, da die Energieerzeugung im Bundesgebiet weit geringere spezifische Emissionen verursacht als die Energieerzeugung auf dem Gebiete der DDR.

[9] Darüber hinaus müssen die innerdeutschen Energielieferungen in beiden Richtungen soweit wie möglich verstärkt werden. Dies wird zur Rationalisierung der Versorgungsstruktur, zu Kostensenkungen und, worauf es hier ankommt, zu Verringerungen der CO<sub>2</sub>-Emissionen führen.

## 5.2 Versorgung mit Primärenergie

### 5.2.0 Zielsetzung

[10] Das Ziel jeder Politik einer Reduktion der CO<sub>2</sub>-Emissionen muß sein, den Einsatz und die Verbrennung fossiler Energieträger nach Maßgabe ihrer spezifischen CO<sub>2</sub>-Emissionen zu verringern.

Wir haben uns zum Ziel gesetzt, die CO<sub>2</sub>-Emissionen im vereinten Deutschland bis zum Jahre 2005 um 30 Prozent zu reduzieren. Dies wird nur erreicht werden können durch eine möglichst starke Einschränkung des Mineralölverbrauchs, d. h. eine möglichst starke Reduktion der Öleinfuhren und, eine Verringerung der Förderung und des Verbrauchs heimischer Kohle. Dagegen könnte der Erdgasverbrauch mit dem Ziel der Substitution CO<sub>2</sub>-intensiver Energieträger in den durch die Einfuhrmöglichkeiten gesetzten Grenzen steigen.

Wir sind uns bewußt, daß die Verringerung der Förderung und des Verbrauchs von Steinkohle und/oder Braunkohle sozial- und regionalpolitische Probleme aufwirft. Das gilt übrigens gleichermaßen für die westdeutsche Steinkohle und die mitteldeutsche Braunkohle, die annähernd die gleiche Zahl von Ar-

beitnehmern beschäftigen. Ohne diese Fördereinschränkungen könnte das Ziel einer angemessenen Verringerung der CO<sub>2</sub>-Emissionen nicht verwirklicht werden.

### 5.2.1 Stein- und Braunkohle

[11] Wir sind der Auffassung, daß es, um die geforderte Reduktion der CO<sub>2</sub>-Emissionen bis zum Jahre 2005 zu erreichen, nötig ist, die Förderung von Kohle im Bundesgebiet deutlich zu vermindern. Wir lassen dabei offen, ob die erforderliche Reduktion der Förderung bei der Steinkohle oder der Braunkohle vorgenommen wird. Dies ist eine Entscheidung, die in die ausschließliche Kompetenz der Regierungen des Bundes/Deutschlands und von Nordrhein-Westfalen fällt.

[12] Nachstehend werden Empfehlungen für die Verringerung der Förderung sowohl der Steinkohle wie auch der Braunkohle gegeben. Diese Vorschläge sind zu verstehen als eine von mehreren Möglichkeiten einer Zurückführung der Förderung beider Kohlenarten. Wir lassen offen, ob statt dieses intermediären Vorschlages, der Reduktion der Förderung einer Kohlenart zugunsten der anderen Kohlenart der Vorrang gegeben werden soll.

### 5.2.2 Steinkohle

[13] Die Steinkohlenförderung des Bundesgebietes sollte bis 2005 zurückgeführt werden auf 35 bis 40 Mio. Jahrestonnen (jato). Dies entspricht der Fördermenge gemäß dem Minderheitsvotum der Mikat-Kommission.

Dies sollte erreicht werden mit den in der Vergangenheit bewährten Mitteln der Kohlepolitik. Wir gehen dabei davon aus, daß entsprechend den Empfehlungen der Mikat-Kommission das System des Kohlepfennigs abgelöst wird durch ein System direkter Subventionierung. Mittel wäre somit ein schrittweiser Abbau der Subventionen bis zur Erreichung des reduzierten Förderziels.

[14] Zur Versorgung des DDR-Gebietes sollten in dem für die Versorgung unerläßlichen Maße die Grenzen für Einfuhren aus Polen und der Sowjetunion sowie – zum Einsatz im Küstenraum – für Kohle aus westlichen Ländern geöffnet werden.

### 5.2.3 Braunkohle

[15] Die Förderung von Braunkohle im Bundesgebiet sollte bis zum Jahre 2005 auf 90 bis 110 Mio. t Rohbraunkohle ausgerichtet werden.

[16] Bis spätestens 2005 ist die Braunkohlenförderung im DDR-Gebiet auf 160 bis 180 Mio. jato zu verringern. Ob zu einer ausreichenden Reduktion der CO<sub>2</sub>-Emissionen diese Förderung noch stärker zurückgeführt werden soll, bleibt zu entscheiden.

### 5.2.4 Mineralöl

[17] Die Einfuhr von Mineralöl — Rohöl und Mineralölprodukte — sollte bis zum Jahre 2005 in einem solchen Maße reduziert werden, daß, im Ergebnis, das Gesamt-Mineralölaufkommen ausreicht zur Deckung des sicherlich beachtlichen und nicht zu unterschätzenden Restbedarfs, der nach dem Greifen aller in diesem Programm empfohlenen Regelungen und Maßnahmen verbleibt. Dies gilt für beide Teile Deutschlands. Dabei sollte der Markt des DDR-Gebiets auch für Mineralöleinfuhren aus westlichen Ländern geöffnet werden.

Um die gebotene Verringerung der Einfuhr zu erreichen, sollten — unter Beachtung der außenwirtschaftlichen Zuständigkeiten der Europäischen Gemeinschaften — alle geeigneten energiepolitischen Instrumente eingesetzt werden.

### 5.2.5 Erdgas

[18] Die Förderung von Erdgas aus heimischen Quellen und die Einfuhren von Erdgas sowohl aus dem Nordseeraum als auch aus der Sowjetunion ist zunächst keinerlei Beschränkungen zu unterwerfen. Es sollte aber dafür gesorgt werden, daß die Erdgasversorgungssysteme des Bundesgebietes und des Gebietes der DDR, insbesondere auch durch den Bau von Pipelines, voll integriert werden.

[19] Mit restriktiven Regelungen und Maßnahmen sollte man zuwarten, bis sich abzeichnet, daß das in diesem Programm aufgezeigte, bis zum Jahre 2005 erforderliche Aufkommen an Erdgas erreicht ist.

### 5.2.6 Erneuerbare (allg.)

[20] Unter Zugrundelegung des Kriteriums Wirtschaftlichkeit sind die folgenden erneuerbaren Energien in Betracht zu ziehen:

- Derzeit weitgehend wirtschaftlich: Wasserkraft; Biomasse, hier verstanden als Materie oder Abfallstoff (Ausscheidung oder Rückstand) lebender oder toter Lebewesen, soweit nicht fossiler Natur; insbesondere Müllverbrennung und Pyrolyse, Holz- und Strohverbrennung, Deponie-, Klär- und Biogas; ferner Solarabsorber und einfache Sonnenkollektoren.
- An der Schwelle der Wirtschaftlichkeit: Windenergie, Elektrowärmepumpen und Solarkollektoren für Nahwärmenetze und Warmwassergroßsysteme.
- Zusätzliche Optionen über das Jahr 2000 hinaus: Solarkollektoren für Kleinsysteme, Photovoltaik (direkte Umwandlung von Sonnenenergie in Elektrizität mit Hilfe der durch den Photoeffekt entstehenden elektrischen Strom) und geothermische Kraftwerke.

[21] Wir empfehlen durch geeignete Maßnahmen zu erreichen, daß der Beitrag der erneuerbaren Energien zur Energie- und insbesondere zur Stromversorgung soweit wie möglich erhöht wird. Hierzu sind die erprobten Forschungs-, Entwicklungs- und Markteinführungs-Instrumente zieladäquat einzusetzen.

Im übrigen wird verwiesen auf die Ausführungen zu den erneuerbaren Energien unter 5.3.4, 5.4.3 und 5.5.4.

## 5.3 Erzeugung und Verteilung von Elektrizität und Fernwärme

### 5.3.0 Potentiale der Stromversorgung

[22] Wird, wie dies das Ziel dieses Programmes ist, der Einsatz fossiler Energieträger und hier im besonderen die Verstromung solcher Energieträger verringert, dann stellt sich die Frage, wie die erforderliche Bereitstellung ausreichender Mengen an Elektrizität auch unter Berücksichtigung aller möglichen Wege der Stromeinsparung gewährleistet werden kann. Dies kann auf folgenden Wegen erreicht werden:

- durch die Steigerung des Wirkungsgrades von Steinkohle- und Braunkohlekraftwerken,
- durch Kraft-Wärme-Kopplung,
- durch Umstellung von CO<sub>2</sub>-intensiven auf CO<sub>2</sub>-schwache fossile Einsatzenergien,
- durch Einsatz von Kraftwerken neuer Technologie, insbesondere von Kombikraftwerken,
- durch den Bau und Betrieb von Kraftwerken auf Grundlage erneuerbarer Energien, hier in erster Linie von Windkraftwerken,
- durch Zubau und Betrieb von Kernkraftwerken,
- durch Stromimporte, insbesondere aus Frankreich.

Die deutschen Stromerzeuger werden sich voraussichtlich zusätzlichen Anforderungen stellen müssen, weil Stromexporte in osteuropäische Länder erforderlich werden. Dieses Programm trägt allen diesen Notwendigkeiten Rechnung.

### 5.3.1 Die Ordnung der leitungsgebundenen Energiewirtschaft

[23] Der Studienbericht „A-Gesamt“ enthält Vorschläge für sektorspezifische Maßnahmen im Umwandlungssektor. Es wird empfohlen, entsprechend dem nachstehenden Maßnahmenkatalog vorzugehen. Dabei wird Bezug genommen auf die Kriterien unter 4.8.7 dieses Programms.

[24] Es wird darüber hinausgehend empfohlen, im Energiewirtschaftsgesetz die bereits berücksichtigten Ziele der Sicherheit und Preisgünstigkeit der Energieversorgung zu ergänzen durch das Ziel des Schutzes der natürlichen Lebensgrundlagen.

## Empfehlungen für sektorspezifische Maßnahmen im Umbaubereich

Vorschlag in „A-Gesamt“	Unsere Empfehlung	Anzuwendendes Kriterium <sup>1)</sup>	Begründung und Modalitäten
59 kostenlose Initialberatungen für kleine und mittlere Unternehmen	Ja	3	wird empfohlen
60 Schaffung von Vorstandsressorts in Energieversorgungsunternehmen für die rationelle Energienutzung	Nein	4	kein Eingriff in innere Strukturen
61 Verordnungen zur Nutzung von CH <sub>4</sub> aus Deponien, Klärwerken und Kohlegruben	noch prüfen	—	} ist hinsichtlich der Kriterien und der Praktikabilität noch zu prüfen
62 Wärmenutzungsgebot nach BImSchG	erledigt	2	
63 öffentliche Ausschreibung von zusätzlichen Stromerzeugungskapazitäten	erledigt	2	
64 Erarbeitung von Muster-Konzessionsverträgen für Gemeinden mit dem Ziel gemeinsamer Nutzung von örtlichen Energiequellen	bedingt ja	—	*)
65 Einführung des Prinzips der Minimalkostenplanung (Least Cost Planning)	Nein	—	*)
66 Anforderungen an Mindestwirkungsgrade von Erzeugungsanlagen	bedingt ja	—	*)
67 Präzisierung der „vermieteten Kosten“ bei Strom-, Gas- und Wärmeeinspeisung	erledigt	2	*)
68 Genehmigung der Kooperationsverträge von Eigenzeugern und EVU durch die Fach- und Kartellaufsicht	bedingt ja	7	*)
69 Förderung von Contracting-Unternehmen	noch prüfen	8	keine Eingriffe in innere Strukturen
70 Subventionen für Fernwärmenetzbau	bedingt ja	—	siehe 5.3.6
71 Erweiterung der Grenze von 10 MW auf 50 MW in § 12 des 3. Verstromungsgesetzes	noch prüfen	—	*)
72 Lieferung von Eigenstrom an benachbarte Betriebe ermöglichen	noch prüfen	6	*)
73 Änderung des Mineralölsteuergesetzes	—	—	siehe (5.6.) Verkehr

<sup>1)</sup> Es wird verwiesen auf die Kriterien unter 4.8.7

\*) Begründungen im Text (sofern nicht direkt unter der Tabelle)

## Begründungen

Zu 63: Eine Regelung erübrigt sich, da die Verpflichtung, Aufträge öffentlich auszuschreiben, durch EG-Recht bereits eingeführt wurde.

Zu 64: Unter dem Vorbehalt sorgfältiger Prüfung der Modalitäten.

Zu 65: Die sehr weitgehenden Befragungen von Experten aus den USA und Erörterungen dieses Vorschlages mit deutschen Experten haben nicht erkennen lassen, daß die Einführung des Systems des Least Cost Planning (LCP) eine ins Gewicht fallende Reduktion des Elektrizitätsverbrauchs und der Schadstoffemissionen erbringt. Dabei war zu berücksichtigen, daß der Pro-Kopf-Verbrauch in den USA weitaus höher ist als bei uns, und daß Maßnahmen zur Einsparung von Elektrizität in den USA ganz wesentlich, jedenfalls wesentlich stärker als bei uns, über die Utilities (EVUs) bewirkt werden. Im Bundesgebiet fallen die wesentlichen Regulierungskomplexe des amerikanischen LCP in andere Regelungsbereiche und Zuständigkeiten, z. B., soweit es sich um die Genehmigung von Investitionen handelt, in den Zuständigkeitsbereich des Energiewirtschaftsgesetzes und soweit es sich um Emissionen handelt, in den Zuständigkeitsbereich der Umweltschutzgesetzgebung.

Zu 66: Es sollte aber sorgfältig geprüft werden, ob angesichts der außerordentlichen Unterschiede eine solche Regelung praktikabel ist.

Zu 67: Die geltenden, gegenüber der Lage vor einigen Jahren fortentwickelten Regelungen über die „Einspeisevergütung“ sollten erst dann einer erneuerten Revision unterzogen werden, wenn sich erweist, daß sie entgegen den Erwartungen nicht zufriedenstellen.

Zu 68: Dieser Vorschlag ist zunächst wettbewerbsrechtlich zu prüfen.

Zu 71: Bei diesem insgesamt gutzuheißenden Vorschlag ist zu prüfen, ob hierdurch die Verwendung heimischer Steinkohle nicht über Gebühr eingeschränkt wird.

Zu 72: Hier muß geprüft werden, ob und inwieweit dieser insgesamt gutzuheißende Vorschlag wettbewerbsrechtlich bedenkenfrei ist.

### 5.3.2 Einsatz von fossilen Energieträgern zur Stromerzeugung

[25] Unter dem ausdrücklichen Vorbehalt einer Änderung des Einsatzverhältnisses von Stein- zu Braunkohle (vgl. Abschnitt 5.2.1) wird empfohlen:

- die zu verstromende Menge an westdeutscher Steinkohle zu verringern auf etwa 25 Mio. t, entsprechend dem Minderheitsvotum der Mikat-Kommission,
- die zu verstromende Menge an rheinischer Braunkohle zu verringern auf 70 bis 90 Mio. t, jato Rohbraunkohle.

[26] Die Stromerzeugung aus Braunkohle des DDR-Gebiets ist der verringerten Förderung anzupassen.

[27] Es ist vorzusehen, daß Einfuhrkohle in begrenzten Mengen sowohl entsprechend der bisherigen Handhabung im Bundesgebiet als auch entsprechend den gegenwärtigen Planungen im DDR-Gebiet zur Stromerzeugung eingesetzt wird.

[28] Die Stromerzeugung aus schwerem Heizöl und aus Erdgas ist zu verringern. Dabei ist aber sicherzustellen, daß für Kombiprozesse ausreichend Erdgas zur Verfügung steht.

### 5.3.3 Verbesserung der Wirkungsgrade

[29] Es wird empfohlen, die Elektrizitätsversorgungsunternehmen des Bundesgebietes zu veranlassen, die Wirkungsgrade ihres Kraftwerksparks zu verbessern. (Wirkungsgrad ist der Quotient aus der nutzbar abgegebenen und der eingesetzten Leistung.) Dieses Ersuchen ist durch nachdrückliche energie- und umweltpolitische Interventionen abzusichern.

[30] Durch den Einsatz neuer Techniken sollte der Wirkungsgrad der Stein- und Braunkohle-Kraftwerke (heute etwa 38 %) erhöht und damit zugleich die Menge der Schadstoff- und CO<sub>2</sub>-Emissionen verringert werden. Vor allem kommen in Betracht:

- Kombikraftwerke mit druckaufgeladener Wirbelschichtfeuerung,
- kombinierte Gas- und Dampfturbinenanlagen mit integrierter Kohlevergasung und
- Kombikraftwerke mit kohlebefeuertem Dampferzeuger und vorgeschalteter erdgasbefeuerter Gasturbine

[31] In der DDR ist der vor allem auf die Braunkohle gestützte Kraftwerkspark entsprechend den gegenwärtigen Planungen umfassend zu sanieren und zu erneuern. Hierbei sollten gleichzeitig die oben genannten neuen Kraftwerks-Techniken zum Einsatz gelangen.

### 5.3.4 Einsatz von Erneuerbaren zur Elektrizitäts-Erzeugung

[32] „Neue“ erneuerbare Energien, hier vor allem Sonnen- und Windenergie können – ähnlich wie die

Wasserkraft – einen energie- und umweltpolitisch erwünschten Beitrag zur Stromerzeugung leisten. Diese Energien sind deshalb weiter zu entwickeln. Ihr Einsatz muß gefördert werden, damit ihre technischen und wirtschaftlichen Möglichkeiten voll ausgeschöpft werden können.

Wir empfehlen den weiteren Ausbau des Wasserkraftpotentials durch Zubau kleiner Wasserkraftwerke. Dabei ist zu berücksichtigen, daß die Möglichkeiten eines weiteren Ausbaus aus Kostengründen und wegen des Landschaftsverbrauchs begrenzt sind. Diese Möglichkeiten müssen aber genutzt werden.

Mit den in der Vergangenheit bewährten Mitteln der Forschungs-, Entwicklungs- und Investitionsförderung unter Einschluß von Steuererleichterungen und Subventionen empfehlen wir, den Bau und den Einsatz kleiner Windkraftwerke zu fördern.

[33] Sonnenkraftwerke auf Grundlage der Photovoltaik und deren Komponenten sind durch Forschung und den Bau von Demonstrationsanlagen bis zur technischen Reife und zur wirtschaftlichen Einsatzfähigkeit weiter zu entwickeln. Ob solche Kraftwerke in Deutschland bis zum Jahre 2005 zur Stromerzeugung eingesetzt werden sollen, ist noch zu entscheiden. Es bestehen aber durchaus Möglichkeiten, in dieser Zeit Solarkraftwerke, basierend auf deutscher Technik, in sonnenbegünstigten Ländern – Industrieländer oder Länder der Dritten Welt – zum Einsatz zu bringen. Dort können diese Techniken lebensnotwendig sein.

### 5.3.5 Einsatz der Kernenergie zur Elektrizitätserzeugung

[34] Jede Form der Energienutzung ist mit Umweltbelastungen und vielfältigen Risiken verbunden, die durch Maßnahmen der Vorsorge und Folgenbegrenzung so weit wie möglich verringert werden müssen. Aufgabe der Politik ist es, die verbleibenden Belastungen und Restrisiken gegeneinander abzuwägen und mit den gesamtwirtschaftlichen Bedürfnissen und Zielen in Übereinstimmung zu bringen.

[35] Eine Analyse der vorliegenden Studienberichte zeigt, daß eine Reduktion der CO<sub>2</sub>-Emissionen des Bundesgebietes um 25 % oder des Gebietes eines vereinten Deutschland um 30 % bis zum Jahr 2005 nur mit nicht mehr vertretbaren Anstrengungen und Zuzahlungen zu erreichen ist, wenn zugleich gefordert wird, auf die friedliche Nutzung der Kernenergie zu verzichten.

[36] Im bisherigen Bundesgebiet sollen die in Betrieb befindlichen Kernkraftwerke unter Beachtung der sicherheitstechnischen Erfordernisse weiter am Netz und deren Standorte erhalten bleiben. Über den Zubau von Kernkraftwerken – ggf. nach einem fortentwickelten LWR- oder HTR-Konzept – soll erst nach sorgfältiger Prüfung der energie- und umweltpolitischen Erfordernissen entschieden werden: Strombedarfsentwicklung, Sicherstellung der Kohlenutzung in einem, wenn auch reduzierten Umfang, Verringerung der Schadstoff- und CO<sub>2</sub>-Emissionen, Wettbewerbsfähigkeit des deutschen im Vergleich zum

Stromangebots anderer EG-Länder, Erfordernis von Stromlieferungen in die DDR und osteuropäische Länder. Unverzögerlicher Handlungsbedarf besteht ohnehin nicht.

**[36a]** Die in der DDR im Betrieb und im Bau befindlichen Kernkraftwerke sind nach den für das Bundesgebiet geltenden Regeln sicherheitstechnisch zu prüfen. Entsprechend dem Ergebnis dieser Prüfung sollen diese Kraftwerke entweder weiter betrieben oder stillgelegt bzw. im Bau abgebrochen werden.

**[37]** Ein sorgfältig geplanter Ausbau der Kernenergie, der die neuesten Erkenntnisse der Reaktorsicherheit nutzt, wäre ein möglicher, nach Auffassung einiger Mitglieder der Kommission auch der geeignetste Weg einer Neuorientierung der DDR-Energiewirtschaft mit den Zielen der Verbesserung der Versorgungssicherheit, der Kostenminimierung und der Reduktion der CO<sub>2</sub>- und Schadstoff-Emissionen, welche derzeit unerträglich hohe Belastungen verursachen. Wir sind aber der Auffassung, daß es noch nicht an der Zeit ist, grundlegend zu entscheiden, ob dieser Weg in der DDR gegangen werden soll.

Im übrigen verweisen wir auf Abschnitt 4.6.6 dieses Programms.

### 5.3.6 Ersetzung oder Ergänzung von Elektrizität durch Fernwärme

**[38]** Wo dies wirtschaftlich sinnvoll und für die Belastung der Umwelt vorteilhaft ist, ist die Fernwärmeversorgung weiter auszubauen. Dabei sollte die leitungsgebundene Versorgung mit Erdgas nicht beeinträchtigt werden, da eine hierauf basierende Erdgasheizung die Umwelt weniger belastet als ein Heizungssystem auf der Grundlage ausgekoppelter Wärme aus Block- und Block-Heiz-Kraftwerken, die Kohle unterfeuern.

**[39]** Wenn ein Ausbau des Fernwärmenetzes somit grundsätzlich gutgeheißen wird, ist doch in jedem Einzelfall zu prüfen, ob das Ausmaß der Reduktion der CO<sub>2</sub>-Emissionen das Ausbauprojekt rechtfertigt. Darüber hinaus ist generell zu untersuchen, ob es angeht der ohnehin von der Elektrizitätswirtschaft aufzubringenden Mittel für Investitionen, zumal zur Sanierung der Stromerzeugungsanlagen im Gebiete der DDR, möglich sein wird, auch noch ausreichende Investitionsmittel zu dem in Bericht „A-Gesamt“ geforderten Ausbau der Fernwärmeversorgung aufzubringen. Die Substitution bestehender Kondensationskraftwerke durch Kraft-Wärme-Kopplungsanlagen erfordert hohe Mittel und hat die Stilllegung vorhandener Anlagen und insoweit eine Kapitalvernichtung zur Folge.

## 5.4 Wärmewirtschaft und Wärmemarkt

### 5.4.1 Allgemeine Ausrichtung

**[40]** Eines der wichtigsten Anliegen der Umweltpolitik muß sein, die von der industriellen Wärmewirtschaft ausgehenden Schadstoff- und CO<sub>2</sub>-Emissionen nicht nur kurz- und mittelfristig (bis 2005), sondern

auch langfristig (bis zur Mitte des nächsten Jahrhunderts), entsprechend den umweltpolitischen Vorgaben zu reduzieren. Dies kann nur auf der Grundlage vielschichtiger, langfristig angelegter Forschungen und Entwicklungen geschehen, die folgende Bereiche umfassen müssen:

- rationelle Energieverwendung im Umwandlungsbereich und Entwicklung und Einsatz neuer Umwandlungstechniken, dies vor allem im Bereich der Stromerzeugung;
- bessere Energienutzung im Verwendungsbe-  
reich;
- Umstellung auf fossile Energieträger mit höherer Brennwerteffizienz, hier in erster Linie auf Erdgas;
- Einsatz nicht-fossiler Primärenergien – erneuerbare Energien und Kernenergie – zur Erzeugung und Bereitstellung von Wärme für industrielle Prozesse;
- Entwicklung und Einsatz neuer Sekundärenergieträger, die sich auch zur Lagerung und zum Transport eignen, hier vor allem Wasserstoff.

### 5.4.2 Einsatz neuer Technologien (ausgenommen Kernenergie) zur Erzeugung und Bereitstellung von Wärme

**[41]** Für industrielle Ballungsgebiete empfehlen wir die Entwicklung und den Aufbau von Verbundsystemen

- mit „kalter Fernwärme“: Nutzung von Niedertemperaturwärme aus Kühltürmen, Industrieanlagen usw. mit Hilfe von Wärmepumpen, und/oder
- mittels geschlossener Kreisläufe für den Transport chemisch gebundener Energie: z. B. Wärmetransport mit Salz-Ammoniak-Gemischen.

**[42]** Wasserstoff, erzeugt durch chemische Reaktion von Kohlenstoff mit Wasserdampf oder mit Hilfe der Elektrolyse, ist keine Primärenergie, sondern ein vielfältig verwendbarer, nicht leitungsgebundener, aber transport- und lagerfähiger, die Umwelt kaum belastender Sekundärenergieträger, der fossile Energieträger und Elektrizität ersetzen kann und vor allem als Kraftstoff im Straßenverkehr Aussichten eröffnet, aber noch schwer zu lösende Probleme aufwirft. Man sollte dabei nicht übersehen, daß zur elektrolytischen Erzeugung von Wasserstoff Elektrizität in großen Mengen benötigt wird, die bereitgestellt werden könnte durch herkömmliche Wärmekraftwerke, Wasserkraftwerke, photovoltaische oder thermische Solarkraftwerke und Kernkraftwerke.

**[43]** Empfohlen werden:

- Forschungs- und Entwicklungsarbeiten auf dem Gebiet des Wasserstoffs: Erzeugung, Transport, Speicherung und Nutzung;
- eine Fortführung der Forschungen und Entwicklungen zum Aufbau einer „Wasserstoffwirtschaft“.

[44] Alle auf realistischen Daten basierenden Untersuchungen weisen aus, daß bis zur technischen Reife und bis zu einer so oder so definierten Wirtschaftlichkeit einer „Wasserstoffwirtschaft“ noch ein recht langer Weg zurückzulegen ist. Das gilt vor allem für das Projekt „Solarer Wasserstoff aus dem südlichen Mittelmeerraum“, dessen Realisierung mit einer Vielzahl von technischen, wirtschaftlichen und technischen Risiken verbunden ist.

#### 5.4.3 Einsatz von Erneuerbaren zur Erzeugung und Bereitstellung von Wärme

[45] Zur Deckung des industriellen Raum- und Prozeßwärmebedarfs werden gegenwärtig so gut wie ausschließlich nichterneuerbare Energien eingesetzt. Hier eröffnet sich ein weites Feld zur Einsparung kommerzieller Energien und zur Verminderung der CO<sub>2</sub>-Emissionen.

Es wird daher empfohlen, im Rahmen eines umfassenden Förderungsprogramms dafür zu sorgen, daß erneuerbare Energien im Bereich der industriellen Wärmewirtschaft ihren angemessenen Platz finden. Das gilt auch für Wärmepumpen, die die Umgebungenergie zu nutzen vermögen.

#### 5.4.4 Einsatz von Kernenergie zur Erzeugung und Bereitstellung von Wärme

[46] Eine Analyse der Perspektiven der langfristigen Deckung des Wärmebedarf ergibt: Nach heutigem Kenntnisstand gibt der Einsatz von Kernenergie, und

hier vor allem des Hochtemperaturreaktors eine realistische Chance, wesentlich beizutragen zur Schließung der Versorgungslücke aus der CO<sub>2</sub>-bedingten Verringerung des Einsatzes fossiler Brennstoffe.

Wegen der herausragenden inhärenten Sicherheit, und der Möglichkeit, Wärme hoher Temperatur auszukoppeln, ist die Technik des HTR zukunftsweisend.

[47] Wir empfehlen daher die Weiterentwicklung des Hochtemperaturreaktors (HTR) mit den Zielen

- Nuklearwärme in Fernwärmesysteme einzuspeisen;
- Raum- und Prozeßwärme auch zur Erzeugung von Wasserstoff bereitzustellen;
- Gasspaltung mit Hilfe von HTR, Transport des Gases zu Fernwärmenetzen und Einbindung der nuklearen Energie durch Gassynthes (Adam-Eva-Prinzip).

#### 5.4.5 Sektorspezifische Handlungsempfehlungen für mittelständische Branchen und Organisationen ohne Erwerbscharakter

[48] Der Studienbericht „A-Gesamt“ enthält sektorspezifische Vorschläge für mittelständische Branchen in Industrie und im Kleinverbrauch, sowie Organisationen ohne Erwerbscharakter.

[49] Es wird empfohlen, entsprechend dem nachstehenden Maßnahmenkatalog vorzugehen. Dabei wird Bezug genommen auf die Kriterien unter 4.8.7 dieses Programms.



**Empfehlungen für sektorspezifische Maßnahmen für mittelständische Branchen  
in Industrie und Kleinverbrauch**

Vorschlag in „A-Gesamt“	Unsere Empfehlung	Anzuwendendes Kriterium <sup>1)</sup>	Begründung und Modalitäten
22 Motivationsmaßnahmen für Leiter und Controller	Ja	3	ja
23 kostenfreie Initialberatung und Bereitstellung von Meßgeräten	Ja	3	ja
24 Beratungsvermittlung	Ja	3	Ja
25 Wärmenutzungsgebot nach BImSchG	erledigt	2	*)
26 verbesserte Umsetzung der Anforderungen nach Nr. 3.1.2 TA-Luft	noch prüfen	—	*)
27 Fortbildung für Anwender, Berater, Hersteller, Installationsgewerbe	Ja	3	
28 Forschungsverbundvorhaben	Ja	3	
29 Fortbildung und Beratung	Ja	3	
30 Finanzierungs- und Bürgschaftsprogramme zur Energieeinsparung	Ja	—	*)
31 Einführung von Energiekennzahlen für Gebäude und geleaste Objekte	Ja	—	
32 Abbau institutioneller Hemmnisse durch Selbstverständnis der Administration als Dienstleistungsunternehmen	Nein	4	
33 Änderung des Mineralölsteuergesetzes	—	—	siehe Verkehr
34 Aufbau einer leistungsorientierten Energieagentur	Nein	4	*)
35 Förderung von Contracting-Unternehmen	noch prüfen	8	*)

<sup>1)</sup> Es wird verwiesen auf die Kriterien unter 4.8.7

\*) Siehe im Text (sofern nicht direkt unter der Tabelle)

*Begründungen*

Zu 25: Ein Wärmenutzungsgebot wurde inzwischen eingeführt.

Zu 26: Es müßte zunächst klargestellt werden, wie die vorgeschlagene bessere Umsetzung in 3.1.2 TA-Luft im Einzelnen aussehen soll.

Zu 30: Der Anwendungsbereich und die -kriterien sind aber noch festzulegen.

Zu 34: Kein Eingriff in die Organisationsstrukturen.

Zu 35: Keine Förderung von Unternehmen, sondern nur von Aktivitäten.

Tabelle 3

**Empfehlungen für sektorspezifische Maßnahmen für Organisationen ohne Erwerbscharakter**

Vorschlag in „A-Gesamt“	Unsere Empfehlung	Anzuwendendes Kriterium <sup>1)</sup>	Begründung und Modalitäten
36 Motivationsmaßnahmen für Leiter, Kämmerer und Hausmeister	Ja	3	Ja
37 kostenlose Initialberatung	Ja	3	Ja
38 Fortbildung für Anwender, Berater, Hersteller, Installationsgewerbe <sup>1)</sup>	Ja	3	Ja
39 Forschungsverbundvorhaben	Ja	3	
40 Aufweichung kameralistischer Budgetplanung und Stärkung betriebswirtschaftlicher Denkweisen	Nein	4	
41 Finanzhilfen bei sehr rentablen Investitionen trotz Überschuldung	noch prüfen	—	
42 Verordnungen zum Schutz der Nutzer (WSchVO, HeizanlagenVO)	noch prüfen	—	
43 Einführung von Energiekennzahlen für geleaste Objekte	Ja	—	
44 Konzentration der Kompetenzen auf Energiereferat oder -Abteilung	Nein	4	siehe 34
45 Aufbau einer leistungsorientierten Energieagentur	Nein	4	siehe 34
46 Förderung von Contracting-Unternehmen	noch prüfen	8	siehe 35

<sup>1)</sup> Es wird hingewiesen auf die Kriterien unter 4.8.7.

## 5.5 Private Energienutzung und Deckung des gewerblichen Niedertemperatur-Wärmebedarfs

### 5.5.1 Vorbemerkungen

**[50]** Im Bereich der Haushalte und Kleinverbraucher kann das Ziel, die Schadstoff- und CO<sub>2</sub>-Emissionen nachhaltig zu verringern, vor allem durch Energiesparen erreicht werden:

- Verminderung des Raumwärmebedarfs,
- Verringerung des Energiebedarfs für Brauchwasser,
- Einführung stromsparender Geräte.

Diese Maßnahmen werden dadurch erleichtert, daß der Energieverbrauch der privaten Haushalte weitgehend frei ist von beschränkenden Bindungen durch die Europäische Gemeinschaft.

**[51]** Im Gebiet der DDR sind die Möglichkeiten, Energie zu sparen, noch weitgehend unerschlossen. Wichtigstes Aktionsfeld ist der Wärmeverbrauch in den Haushalten und in Gewerbe und Industrie. Ins Gewicht fällt nicht nur die Verringerung des Energieverbrauchs, die von einer Erhöhung der Energie- und im besonderen der Elektrizitätspreise auf kostendeckendes Niveau ausgehen wird. Der Energieverbrauch der Haushalte und Kleinverbraucher kann darüber hinaus deutlich reduziert werden

- durch bislang weitgehend fehlende Wärmedämmung,
- dadurch, daß Möglichkeiten geschaffen werden, die Heizungen – ggf. mittels Thermostaten – zu regulieren,
- durch verbesserte Warmwasserbereitung,
- durch den Einsatz energiesparender Haushaltsgeräte.

Es handelt sich um ein beachtliches Potential, dessen Größe derzeit noch nicht einmal geschätzt werden kann.

### 5.5.2 Einsparung von Wärme durch Wärmedämmung

**[52]** Für die Raumheizung werden große Mengen an fossil erzeugter Wärme benötigt. Eine Verringerung des Verbrauchs tut daher not. Verstärkte Wärmedämmung ist das geeignetste Mittel. Deshalb empfehlen wir ein umfassendes Programm zur Verbesserung der Wärmedämmung in Wohn- und Geschäftsbauten, sowohl für die in der Anzahl begrenzten Neubauten als auch im Wege der Modernisierung der umfangreichen Altbau- und Altwohnungsbestände (Altbau-sanierung). Architekten, Bauherren, Baubesitzer und Bauhandwerk müssen umfassend unterrichtet werden.

[53] Die der Enquete-Kommission vorliegenden Gutachten sehen die Installation von Wärmedämmungen in Altbauten nur dann als sinnvoll an, wenn die wärmetechnische Verbesserung gleichzeitig mit den „sehr umfangreichen, aus bautechnischen Gründen notwendigen Sanierungen der Gebäude“ vorgenommen werden. Dadurch wird weitgehend der Rhythmus der Einführung verbesserter Wärmedämmung im Altbaubestand bestimmt.

[54] Die vorliegenden Berichte halten außerordentlich hohe Investitionen zur Installation verbesserter Wärmedämmung für erforderlich: im Reduktionsszenario „Energiepolitik“ Investitionskosten verteilt über die Jahre 1987 bis 2005 in Höhe von 164 Mrd. DM und jährliche Nettokosten von etwa 1,6 Mrd. DM. Die Kommission hatte nicht die Möglichkeit, diese Beträge zu verifizieren, kritische Stellungnahmen gelangen zu noch wesentlich höheren Beträgen.

Tabelle 4

### Empfehlungen für sektorspezifische Maßnahmen für den Raumwärmebereich

Vorschlag in „A-Gesamt“	Unsere Empfehlung	Anzuwendendes Kriterium <sup>1)</sup>	Begründung und Modalitäten
1 Förderung von Fortbildung (Architekten, Handwerk)	Ja	3	wird uneingeschränkt gutgeheißen
2 Novellierung der WSchVO (auch für Altbau) und der HeizanlagenVO	Ja	11	*)
3 Stichprobenkontrollen der o. g. Verordnungen	Ja	—	*)
4 subventionierte Vor-Ort-Beratung	Ja	3	uneingeschränkt gutgeheißen
5 Wärmepaß bei Vermietung und Verkauf	noch prüfen	9	Prüfen auf Praktikabilität hin
6 Begrenzung der Umlagefähigkeit hoher Heizenergiekosten	noch prüfen	9	Prüfen auf Praktikabilität hin
7 verbrauchsabhängige Grundtarife	Nein	2	*)
8 saisonale Unterscheidung der Arbeitspreise	Nein	2	*)
9 Einführung einer Exergieabgabe <sup>2)</sup> auf Endenergieträger	Nein	—	nicht praktikabel
10 Bürgschaften, Zinsverbilligungen oder Abschreibungsmöglichkeiten bei Energieeinsparinvestitionen der Zielgruppen	Ja	—	*)
11 zeitlich befristete Möglichkeit zur Umlage von Energieeinsparinvestitionen	Ja	—	*)
12 Förderung von Energiedienstleistungs- und Contracting-Unternehmen (Vertragsgestaltung; fallweise oder periodische Beratungspflicht)	noch prüfen	8	kein Eingriff in innere Strukturen

<sup>1)</sup> Es wird verwiesen auf die Kriterien unter 4.8.7

<sup>2)</sup> Die Exergie einer Energieform ist die maximale Energiemenge, die aus dieser Energieform in technische Arbeit umgesetzt werden kann.

\*) Siehe Text (sofern nicht direkt unter der Tabelle)

#### Begründungen

Zu 2: Dieser Vorschlag wird gutgeheißen, die Anwendungsbereiche und die Kriterien sind aber zu untersuchen und zu präzisieren.

Zu 3: Es ist zu fragen, ob dies Gegenstand eines Regelungs- und Maßnahmenkataloges sein sollte.

Zu 7: Die inzwischen verabschiedete neue Regelung sollte in ihrer Anwendungsmöglichkeit und ihren Auswirkungen zunächst getestet werden.

Zu 8: siehe zu 7

Zu 10: Die Anwendungsbereiche und -kriterien sollten sorgfältig überprüft werden.

Zu 11: siehe zu 10

[55] Unter diesen Umständen wird empfohlen, schrittweise vorzugehen: Das Wärmedämmungsprogramm sollte unverzüglich anlaufen und dann Jahr für Jahr unter den Gesichtspunkten der Kosten und der Effizienz überprüft und angepaßt werden.

[56] Es wird empfohlen, dieses Wärmedämmungsprogramm vorrangig im Wege der Bezuschussung und von Steuererleichterungen zu fördern. Dabei kann in dem Maße, in welchem Mittel aus einer CO<sub>2</sub>-Steuer oder -Abgabe aufkommen, der Zuschuß verstärkt werden.

[57] Der Studienbericht „A-Gesamt“ enthält Vorschläge für sektorspezifische Maßnahmen für den Raumwärmesektor. Es wird empfohlen, entsprechend dem nachstehenden Maßnahmenkatalog vorzugehen. Dabei wird Bezug genommen auf die Kriterien unter 4.8.7 dieses Programms.

### 5.5.3 Einsparung von Energie durch rationellere Energienutzung im Bereich von Haushalt und Kleinverbrauch

[58] Wir empfehlen einen umfassenden Maßnahmenkatalog zur Einsparung von Energie in den privaten Haushalten und bei den Kleinverbrauchern auf den Weg zu bringen. Wichtigste Mittel und Wege sind:

- kontrollierte Lüftung,
- angepaßte Heizsysteme,
- stromsparende Haushaltsgeräte und Beleuchtung:
  - Koch- und Backgeräte,
  - Kühl- und Gefrieranlagen,
  - Wasch- und Spülmaschinen,
  - Wäschetrockner,
  - Fernsehgeräte,
  - Beleuchtung.

[59] Der Studienbericht „A-Gesamt“ enthält Vorschläge für sektorspezifische Maßnahmen im Bereich Elektrogeräte, Pumpen und Ventilatoren. Es wird empfohlen, entsprechend dem nachstehenden Maßnahmenkatalog vorzugehen. Dabei wird Bezug genommen auf die Kriterien unter 4.8.7 dieses Programms.

Tabelle 5

#### Empfehlungen für sektorspezifische Maßnahmen im Bereich Elektrogeräte, Pumpen, Ventilatoren

Vorschlag in „A-Gesamt“	Unsere Empfehlung	Anzuwendendes Kriterium <sup>1)</sup>	Begründung und Modalitäten
13 freiwillige Selbstverpflichtungen der Hersteller (oder Verordnungen über Mindesteffizienz), periodische Revision	Ja	3	Ja
14 Angabe von Jahresstromkosten gemäß DIN-Betriebsbedingungen beim Verkauf	Ja	3	Ja
15 Fortbildung des Verkaufspersonals der Geräte	Ja	3	Ja
16 Nutzung von EDV-gestützten Beratungseinrichtungen	Ja	3	Ja
17 Einführung tageszeitlich und saisonal kostenorientierter Arbeitspreise und kostenorientierter Grundpreise	Nein	2	Begründung wie 7 und 8 Tabelle 5
18 aktuelle Verbrauchs- und Kostenanzeigen beim Verbraucher in der Wohnung	Ja	3	Ja
19 DIN-Normen praxisingerecht und innovationsoffen gestalten	Ja	—	Ja
20 Übernahmeregelungen für energiesparende Investitionen für Nachmieter	noch prüfen	9	Prüfung auf Praktikabilität
21 Abschaffung für Leuchtmittelsteuer	Ja	—	Ja

<sup>1)</sup> Es wird verwiesen auf die Kriterien unter 4.8.7.

**5.5.4 Einsparung von Energie durch Einsatz regenerativer Energien und von Wärmepumpen**

[60] Die Möglichkeiten dezentraler Sonnenenergienutzung sind noch wenig erschlossen. Wir empfehlen ein umfassendes Regelungs- und Maßnahmenprogramm zur Förderung von Geräten der passiven Sonnenenergienutzung zur Heizung und Warmwasserbereitung in privaten Haushalten. Diese Förderung sollte durch Bezuschussung wie auch im Wege von Steuererleichterungen erfolgen.

Die Bemühungen zur Erforschung, Entwicklung, Erzeugung und Verwendung erneuerbarer Energie in privaten Haushalten und im Kleinverbrauch sind zu verstärken. Besondere Förderung verdient der Ausbau der passiven Sonnenenergienutzung zur Heizung und Warmwasserbereitung.

[61] Wärmepumpen sind geeignet, die Umgebungswärme zu nutzen und dadurch zur Verringerung des Verbrauchs fossiler Energieträger und damit der CO<sub>2</sub>-Emissionen beizutragen. Es wird daher empfohlen, ihren Einsatz zu fördern.

**5.6 Der Energieverbrauch des Verkehrssektors**

[62] Die Diskussion zwischen den Unterzeichnern dieses Programms über die verkehrspolitischen Maßnahmen mit dem Ziele einer Reduktion der CO<sub>2</sub>-Emissionen konnten noch nicht abgeschlossen werden.

Nachstehende Tabelle 6 gibt einen Überblick über die Dimensionen und Perspektiven im vereinten Deutschland.

Tabelle 6

**Entwicklung des Primärenergieverbrauchs und der CO<sub>2</sub>-Emissionen im Bereich des Verkehrs<sup>1)</sup>**

	Primärenergieverbrauch in Mio. t SKE		CO <sub>2</sub> -Emissionen in Mio. t SKE	
	1987/88	2005	1987/88	2005
Bundesgebiet *) . . . . .	68,0 <sup>2)</sup>	60,8 <sup>2)</sup>	141 <sup>3)</sup>	129 <sup>4)</sup>
Gebiet der DDR *) . . . . .	11,2 <sup>5)</sup>	15,8 <sup>6)</sup>	25,6 <sup>7)</sup>	34,4 <sup>6)</sup>
Deutschland . . . . .	79,2	76,6	166,5	163,5

\*) wie bis zum 3. Oktober 1990

1) Zugrundegelegt ist das Reduktions-Szenario „Energiepolitik“.

2) A-Gesamt Tabelle 4.1.2–11.

3) A-Gesamt Tabelle 2.2–2.

4) A-Gesamt Tabelle 4.1.2–13.

5) Kap. 3.7 – Tabelle 13.

6) Kap. 3.7 – Tabelle 15; angenommen: gleicher Pro-Kopf-Verbrauch wie im Bundesgebiet.

7) Kap. 3.7 – Tabelle 14.

In dieser Lage greifen wir die folgenden von der Kommission einvernehmlich verabschiedeten Vorschläge auf:

[63] Um die im Verkehrssektor im Trendfall zu erwartenden Emissionszuwächse<sup>1)</sup> abzufangen, und darüber hinaus in Zukunft die Emissionen zu reduzieren, bedarf es einer umfassenden konzeptionellen Fortentwicklung des Verkehrsbereichs sowie einer Modernisierung der Verkehrstechnik mit abgestimmten fahrzeugtechnischen und verkehrsbeeinflussenden Maßnahmen.

Auf der Grundlage der vorliegenden Studien können Emissionsminderungspotentiale gemäß der zu erwartenden Entwicklung im Personen- wie im Güterverkehr auf folgende Weise erreicht werden:

- Verkehrsvermeidung,
- Verminderung der Zuwächse von Verkehrsleistungen im Straßen- und Flugverkehr,
- Verlagerung von Verkehrsleistungen auf energieeffektivere und emissionsärmere Verkehrsmittel,
- umweltverträgliche Verkehrsbwicklung und Verbesserung der Verkehrsauslastung,
- technische Energieeinsparung an Verhkersmitteln (bei Herstellung und Gebrauch) sowie technische Maßnahmen zur Emissionsminderung und Schadstoffrückhaltung,
- Verhaltensänderungen.

Hierbei ist wichtig, daß Maßnahmen zur Begrenzung des Verkehrs insbesondere des Straßenverkehrswachstums zugleich positive Auswirkungen auf die Emissionen von Stickoxiden, Kohlenmonoxid, Nicht-Methan flüchtigen Verbindungen und Lärm haben und zugleich die sozialen und ökologischen Folge-

1) Bis zum Jahr 2005 ist je nach Basis der angenommenen Wohnbevölkerung bezogen auf das Jahr 1987 mit einer Erhöhung der CO<sub>2</sub>-Emission im Personen- und Güterverkehr um 21 bis 28 Prozent zu rechnen.

schäden des Verkehrs (Auswirkungen auf die Gesundheit, auf Böden und Vegetation, Unfälle, Flächenverbrauch etc.) reduzieren.

[64] Aufbauend auf dem Studienprogramm ersuchen wir die Bundesregierung, ein abgestimmtes Konzept für fahrzeugtechnische und verkehrsleitende Maßnahmen bis zum ersten Dezember 1991 vorzulegen. Folgende Aspekte seien hervorgehoben:

1) Wir empfehlen, die Emissionsminderungspotentiale im Verkehrssektor weitestgehend auszuschöpfen.

Im Rahmen der zu erstellenden energiepolitischen Gesamtkonzeptionen sollen wirksame preispolitische Maßnahmen zur Minderung verkehrsbedingter Schadgase konkretisiert werden.

2) Nach unserer Auffassung ist weitgehende Internalisierung externer Kosten der Verkehrssysteme von prioritärer Bedeutung. Vor dem Hintergrund der zukünftigen Liberalisierung des europäischen Binnenmarktes ist dies von Bedeutung.

3) Sowohl im Personenverkehr als auch im Güterverkehr sollten die technischen Einspar- und Rückhaltepotentiale möglichst weitgehend und möglichst schnell ausgeschöpft werden.

4) In diesem Rahmen empfehlen wir, den Katalysator (bundesweit und EG-weit) für Pkw und Dieselfahrzeuge umfassend einzuführen, um die Emissionen von Stickoxiden, Kohlenmonoxid und Nicht-Methan-flüchtigen Verbindungen, Staub und Ruß soweit wie möglich zu beschränken.

[65] Aufgrund der Ergebnisse der für uns durchgeführten Studien halten wir unter anderem umfassende Maßnahmen in folgenden Bereichen für notwendig:

### 1) Im Rahmen der Ordnungs- und Finanzpolitik:

a) die Schaffung und Erweiterung geeigneter *ordnungsrechtlicher Instrumente*, insbesondere:

- Fortschreibung der Richtlinie 70/220 EWG zur Sicherstellung EG-weiter Grenzwerte bis 1992 nach dem neuesten Stand der Abgasreinigungstechnik;
- Zulassungsvorschriften für Transportmittel zur Ausschöpfung technischer Einsparungs- und Rückhaltepotentiale, d. h. verschärfte Abgasvorschriften besonders für Lkw; Verbrauchsvorschriften für Kraftfahrstoff; Geschwindigkeitsregler für Lkw;
- Einschränkung des innerdeutschen Luftverkehrs durch Verlagerung auf die Schiene, Sonderregelungen für Fahrzeuge des öffentlichen Personennahverkehrs und emissionsarme Fahrzeugen, Verordnungen zum Abfallgesetz (Autoverschrottung).

b) Förderrichtlinien, die eine ökologische Orientierung von Verkehrsplänen und Maßnahmen sicherstellen

- Novellierung des Verkehrswegerechts,

- Novellierung des Gemeindeverkehrsfinanzierungsgesetzes.

c) Auf Bundesebene: die Umstellung des bestehenden Steuersystems auf verkehrsträgerspezifische Steuern, Abgaben oder Sonderabgaben bei gleichzeitigem Abbau von Steuerprivilegien für den Kfz-Verkehr (Umsetzung des Verursacherprinzips), ferner:

- eine verursachergerechte Wegekostenbelastung für Bahn und Straße,
- die Umwandlung der Kilometerpauschale in eine allgemeine Entfernungspauschale.

d) Auf *Gemeindeebene*: Im Rahmen ihrer Möglichkeiten sollten die Gemeinden alle zweckdienlichen Maßnahmen zur Reduktion des Energieverbrauchs im Verkehrsbereich und die von diesem Bereich ausgehenden Luftschadstoff- und CO<sub>2</sub>-Emissionen ergreifen.

### 2) Im Rahmen der Investitionspolitik:

a) Auf *Bundes- und Landesebene*: verstärkte Investitionen zur Förderung des umweltfreundlichen Verkehrs durch

- Kapazitätserweiterung der Bahn durch zügigen Ausbau des europäischen Hochgeschwindigkeits-Schiennetzes,
- Übernahme der Fahrwegskosten der Bahn durch den Bund,
- Ausbau des kombinierten Güter-, Straßen- und Bahnverkehrs.

b) Auf *Gemeindeebene*: Förderung des öffentlichen Personennahverkehrs durch

- Investitionen zur Verstärkung des Verkehrsflusses, z. B. Bau unabhängiger Streckenführung und Einsatz von Betriebsleitsystemen im öffentlichen Personennahverkehr,
- kombinierter Personenverkehr, z. B. Park & Ride, Umweltabos, Einsatz von Kleinbussen und Taxen,
- Förderung des nichtmotorisierten Verkehrs für Kurzstrecken, z. B. Ausbau von Radfahrwegen, Ausbau verkehrsberuhigter Zonen.

### 3) Im Rahmen von Maßnahmen zur Verhaltensbeeinflussung:

- Werbekampagnen für ökologisches Verkehrsverhalten und zur Aufklärung über die Umweltbelastung durch den Verkehr.
- Umwelt- und Verkehrserziehung (Aufklärung und Motivation) zur Erhöhung der sozialen Akzeptanz des Verzichtes auf Energiedienstleistungen.

### 4) Im Rahmen der Siedlungs- und Raumplanung:

- Als langfristige Maßnahme empfehlen wir Veränderungen von Siedlungsstrukturen und Raumnutzungsplänen, die geeignet sind, den Energieein-

satz, die Schadstoffemissionen und andere ökologische Belastungen des Verkehrssektors zu vermindern.

[66] Den oben genannten Maßnahmen entsprechend halten wir eine „integrierte umweltgerechte Verkehrsplanung“ für unabdingbar. Das bedeutet, daß verkehrsträgerübergreifend unter Beteiligung aller relevanten Politikbereiche integrierte Verkehrsentwicklungspläne erarbeitet und im Hinblick auf die Reduzierung verkehrsbedingter Schadgasemissionen erstellt und umgesetzt werden sollen. Hierbei sind Vorgaben u. a. aus den Bereichen Umwelt und Energiepolitik sowie Raumordnung und Städtebau bei der Entwicklung von Maßnahmenkonzepten zu berücksichtigen.

Auf allen Ebenen (Bund, Länder und Gemeinden) sind neue, umweltorientierte Verkehrsentwicklungspläne zu erstellen. Daraus ergibt sich, daß Verkehrsmaßnahmen auf den oben genannten Ebenen nur verabschiedet (und demnach finanziert) werden können, wenn sie aus den oben definierten umweltgerechten Verkehrsentwicklungsplänen abgeleitet worden sind. Dies erfordert eine entsprechende ökologische Orientierung der Bundesverkehrswegeplanung sowie ein umweltfreundliches europaweites Verkehrskonzept.

[67] Wir empfehlen, die Verkehrsstruktur im Gebiet der DDR\*) schrittweise an die Verkehrsstruktur des Bundesgebiets\*) anzupassen. Dabei sollte der bestehende Vorrang des Eisenbahnverkehrs und des öffentlichen Personennahverkehrs tunlichst erhalten werden. Mit dieser Maßgabe gelten die oben bezeichneten Empfehlungen auch für die Verkehrswirtschaft im Gebiet der DDR\*).

## 5.7 Eine CO<sub>2</sub>-Abgabe

[68] Wir haben uns unter 4.8.3 für eine CO<sub>2</sub>-Steuer oder -Abgabe ausgesprochen und zugleich uns unter 2.6. mit der Problematik der Einbindung in die Europäische Gemeinschaft auseinandergesetzt. Auf dieser Grundlage geben wir die folgenden Empfehlungen:

- 1) Es sollte eine CO<sub>2</sub>-Abgabe eingeführt werden, für die die CO<sub>2</sub>-Emissionen die Bemessungsgrundlage sind. In ihrer Wirkung würde sie die Kosten und Preise der Endenergieträger und der energieintensiven Produkte nach Maßgabe der CO<sub>2</sub>-Emissionen erhöhen.

Die deutsche Wirtschaft ist in den Gemeinsamen Markt mit der Perspektive eines Europäischen Binnenmarktes eingebunden. Für die Einführung einer CO<sub>2</sub>-Abgabe an der Quelle wäre die Zuständigkeit der Organe der Europäischen Gemeinschaft gegeben. Aus wirtschaftspolitischen Gründen kommt ein einzelstaatliches Handeln nicht in Frage.

- 2) Selbst soweit Deutschland nach den Regeln des Gemeinsamen Marktes (noch) befugt ist, autonom Steuern und Abgaben zu erheben, ist zu bedenken, daß dadurch das Funktionieren des Gemeinsamen Marktes beeinträchtigt werden kann. Im Europäi-

schen Binnenmarkt werden die Binnengrenzen für Güter und Leistungen, d. h. auch für Energie, weitestgehend aufgehoben sein. Unternehmen, die in einem Mitgliedsstaat des Gemeinsamen Marktes autonom ihre Preise erhöhen, werden dem Wettbewerb von Unternehmen anderer Mitgliedsstaaten ungeschützt ausgesetzt sein. Dadurch werden Absatzmärkte und Arbeitsplätze gefährdet werden.

- 3) Diese Einschränkungen gelten nicht oder nur begrenzt, soweit Energie an Endverbraucher geliefert wird. Dann dürfte diese Abgabe aber nicht mehr an der Quelle, sondern müßte auf der Stufe des Letztverbrauchers erhoben werden. Als Bemessungsgrundlage kämen die CO<sub>2</sub>-Emissionen in Betracht, die durch den Verbrauch der privaten Haushalte zur Deckung der Raumwärme und des Strombedarfs und durch den Verbrauch im Verkehrsreich verursacht werden.

Unter diesen Einschränkungen empfehlen wir, um die Einführung einer CO<sub>2</sub>-Abgabe im Rahmen der EG bemüht zu sein. Dies könnte entweder eine Abgabe im Rahmen der Kompetenz der EG oder eine autonome nationale Abgabe in Abstimmung mit den entsprechenden Maßnahmen in den übrigen Mitgliedsstaaten sein. Sie müßte an der Quelle erhoben werden: auf der Ebene der heimischen Energieerzeugung und als Zoll oder Abgabe bei den Energieeinfuhren.

- 4) Es muß offenbleiben, ob die Europäische Gemeinschaft eine solche Abgabe in Abstimmung mit entsprechenden Maßnahmen der energiewirtschaftlich relevanten Drittländer ergreift, oder ob sie dabei autonom vorgeht. Im letzten Fall müßte im Rahmen des GATT erreicht und gewährleistet werden, daß an den Grenzen der Europäischen Gemeinschaft ein Preisausgleich etwa entsprechend den für die EG-Agrarwirtschaft eingeführten Maßnahmen stattfindet.
- 5) Unabhängig von diesen Überlegungen wird empfohlen, auf dem Gebiete des Verkehrs steuerliche Maßnahmen zu ergreifen, die im Ergebnis dazu führen, daß der Verbrauch von Treibstoffen verringert wird. In einer ersten Stufe könnte dies im Wege einer Umstellung der Kraftfahrzeugsteuer auf eine Schafstoffabgabe geschehen. Andererseits lehnen wir ab, Kraftfahrer in einem solchen Ausmaß zusätzlich mit Steuern oder Abgaben zu belasten, daß erforderlich wird, besonders betroffenen Gruppen spezifische Steuerbefreiungen oder Steuerermäßigungen zu gewähren. Eine Steuer oder Abgabe zur Verminderung der CO<sub>2</sub>-Emissionen darf nicht zum Instrument einer Umverteilung werden.
- 6) Wir sehen keine sozialverträgliche Möglichkeit auf Einführung einer Abgabe gemäß den CO<sub>2</sub>-Emissionen, da durch diese Maßnahme hauptsächlich die privaten Haushalte belastet werden.
- 7) Soweit eine Abgabe auf CO<sub>2</sub> erhoben wird, sollte diese Abgabe in der Endphase 2005 eine Höhe erreichen, die ausreicht, um jene Maßnahmen zu finanzieren, die auf der Ebene der Erzeugung, Umwandlung und Nutzung von Energie eingeführt werden, um die CO<sub>2</sub>-Emissionen in angemessene-

\*) jeweils wie bis zum 03.10.1990

nem Umfang zu verringern. Ein Überschuß für die allgemeine Finanzverwaltung sollte nicht verbleiben.

**Zusatzvotum der Kommissionsmitglieder Prof. Dr. Hennicke und Müller (Düsseldorf) sowie Prof. Dr. Bach, Frau Prof. Ganseforth, Prof. Dr. Graßl, Prof. Dr. Meyer-Abich, Frau Dr. Hartenstein, Dr. Knabe, Dr. Kübler zu Abschnitt E: „Nationales Vorgehen zur Reduktion energiebedingter klimarelevanter Spurengase“**

Inhalt:

**I. Einleitung/ Gesamtwürdigung**

**II. Ausgewählte Kritikpunkte**

1. Unausgewogene Darstellung der Varianten
2. Strukturelle Hemmnisse vernachlässigt
3. „Gegen den Weltmarkt steuern“
4. Nicht nachvollziehbare Preisannahmen
5. Ungereimtheiten bei der Potentialermittlung
6. Methodik beim Vergleich von Kosten und Wirtschaftlichkeit
7. Implikationen und Widersprüche der Reduktionsvariante ‚Energiepolitik‘ bei fortbestehender Kernenergienutzung
8. Ausstiegs-Variante nicht gründlich analysiert
9. Atomenergie contra Klimaschutz?

**III. Klimaschutz und Verkehrspolitik**

1. Umorientierung in den verkehrspolitischen Zielsetzungen
2. Maßnahmen zur Ausschöpfung des technischen Minderungspotentials
3. Maßnahmen zur Gestaltung des Verkehrsablaufs
4. Korrekturen im Preisgefüge
5. Maßnahmen zur Beeinflussung des Modal Split

**I. EINLEITUNG / Gesamtwürdigung**

Ohne anthropogene Energienumwandlung ist das Bewohnen der Erde undenkbar. Die Vorräte der bisher nahezu ausschließlich genutzten Energieträger sind jedoch begrenzt und ihre Verwendung mit großen Risiken verbunden: Klima- und Umweltprobleme auf der einen und große Sicherheitsrisiken auf der anderen Seite. Die Art der Nutzung der Energie ist zu einer Überlebensfrage geworden, denn mit ihr verbindet sich in besonderer Weise eine universale Deformation der Natur.

Ein grundlegender Ausweg aus dem technologischen und ökologischen Dilemma der Industriegesellschaften ist die rationelle Energienutzung und der bewußte Verzicht auf überzogene ‚Wohlstandsenergie‘. Hierfür wurde in den letzten Jahren vor allem das Konzept umweltverträglicher Energiedienstleistungen entwickelt und konkretisiert. Unser Votum orientiert sich am Ziel einer optimalen Umsetzung dieses Konzepts. Gleichzeitig fordern wir, die Rahmenbedingungen für die Durchsetzung und den Ausbau der regenerativen Energien zu verbessern (z. B. durch Dezentralisierung/Rekommunalisierung der Energieversorgung).

Die Bewertung der Risiken und die Gestaltung der weiteren Energiepolitik darf sich nicht allein auf die Energieversorgung im engeren Sinne beschränken. Die Auswirkungen der heutigen Form der Energienutzung bestehen in problematischen Wechselprozessen mit der Natur. Der Energieeinsatz ist auch ein Schlüsselbereich der industriellen und gesellschaftlichen Entwicklung insgesamt und speziell für die mit dem Einsatz von Großtechnologien verbundenen Risiken. Die Empfehlungen der Enquete-Kommission ‚Schutz der Erd-atmosphäre‘ für das ‚nationale Vorgehen zur Reduktion energiebedingter klimarelevanter Spurengase‘ müssen diese Zusammenhänge beachten und bewerten. Wirksame und dauerhafte Maßnahmen können nur dann erreicht werden, wenn sie die komplexen Ursachen der ökologischen Krise ebenso berücksichtigen wie den systemaren Kontext der Energiepolitik und die sozialen und gesellschaftlichen Folgen einer Klimaschutzpolitik.

Die technologischen Risiken und ökonomischen Zwänge der entwickelten Industriegesellschaften verbinden sich heute zu einer neuen Qualität von Umweltzerstörung. Zwar sind ihre regionalen Auswirkungen und die sozialen Folgen unterschiedlich, aber dennoch gehen die Herausforderungen an den Bestand. Die Ursache liegt in dem in modernen Gesellschaften unbewältigten Problem, das wirtschaftliche und technische Wachstum mit den Bedingungen für die Bewahrung der natürlichen Umwelt in Einklang zu bringen. Damit geht es um eine tiefgreifende Krise der Zivilisation insgesamt. Die zentralen Probleme der Gegenwartsgesellschaft müssen als Folgeprobleme der industriellen Modernisierungsprozesse und ihrer spezifischen Organisationsformen verstanden werden. Die industrielle Dynamik von Wachstum und Veränderung wird von wirtschaftlichen Verwertungsinteressen geprägt, die in einem zunehmenden Widerspruch zu den natürlichen Lebensbedingungen stehen. Diese Dynamik produziert zugleich in einem wachsenden Ausmaß gesellschaftliche Zwänge und Risiken. Eine sozial- und umweltverträgliche ‚Dauerhaftigkeit von Entwicklung‘ (Brundtland-Kommission) erfordert dagegen, die Begrenzungen der Natur zu berücksichtigen und die Nutzung von Zeit und Raum nach ökologischen Zielen zu gestalten.

Der Enquete-Kommission war es aus zeitlichen Gründen (bislang) nicht möglich, diese Zusammenhänge systematisch aufzubereiten und vertieft zu diskutieren. Zudem muß sich auch innerhalb der Kommission das Verständnis für diese Fragen weiter entwickeln, zumal damit ein gesellschaftlicher Zusammenhang thematisiert wird, der auf der einen Seite zwar so tri-



vial ist wie die Benutzung des Autos oder die Gedankenlosigkeit im Alltag, auf der anderen Seite aber auch höchst komplex und so gewaltig, weil er faktisch die moderne Industriegesellschaft zur Disposition stellt.

Die Menschheit steht an einem Scheideweg. Die nächsten Jahrzehnte werden über den sozialen und ökologischen Umbau der Industriegesellschaften entscheiden und damit darüber, ob eine globale Umweltkrise verhindert werden kann. Hierbei sind vor allem die westlichen Industriegesellschaften, deren Wachstumsmodell weltweit dominiert, in besonderer Weise gefordert. Denn im globalen Maßstab entfallen Energienachfrage und Rohstoffverbrauch weit überwiegend auf diese Länder, in denen nur ca. 25 Prozent der Weltbevölkerung leben.

Die o. g. Kommissionsmitglieder halten es für notwendig, daß sich der Deutsche Bundestag auch intensiv mit den gesellschaftspolitischen Folgen und Ursachen einer globalen Umweltkrise befaßt, die durch die Ungerechtigkeit in der Verteilung der Lebenschancen zwischen den Industrie- und Entwicklungsländern weiter zugespitzt wird. Die heute vorherrschenden Wirtschaftsweisen und Lebensformen in den westlichen Industriestaaten gehen auf Kosten der Substanz. Sie sind nicht verallgemeinerungsfähig, ohne den ökologischen Kollaps herbeizuführen.

Mit dieser Einleitung plädieren wir auch dafür, den häufig festzustellenden Widerspruch zwischen der großen Dimension der Probleme und den unzureichenden politischen Schlußfolgerungen zu verringern. Vor dem Hintergrund der Klimagefahren und der daraus resultierenden Einschätzung, daß die weltweite Konfliktpolitik zukünftig sehr viel stärker entlang der Verteilung der begrenzten Naturgüter und des Weltreichtums verläuft, wäre es politisch weder seriös noch zu verantworten, wenn die Schlußfolgerungen und Empfehlungen im Energiebereich vage und unzureichend blieben.

Die wissenschaftlichen Fakten belegen, daß die Schädigungen an den natürlichen Lebensgrundlagen eine kritische Grenze erreichen und tiefgreifende Korrekturen notwendig sind. Wirksamer Klimaschutz ist nicht mit bloßen Ankündigungen und ohne einschneidende Maßnahmen zu erreichen. Dies gilt besonders für eine Politik zum Schutz unserer klimatischen Lebensbedingungen. Das zu verschweigen, wäre fahrlässig. Anderfalls würde auch die Glaubwürdigkeit des Berichts gemindert, zumal die Studien, die der Enquete-Kommission vorliegen, und der Bericht der Energiekoordinatoren, der im wesentlichen die Grundlage für die Kapitel D.2. – 4. bildet, weitgehende politische Handlungsmöglichkeiten aufzeigen. Die Enquete-Kommission darf sich deshalb bei ihren Maßnahmenvorschlägen nicht von parteipolitischer Taktik leiten lassen. Ein wichtiger Sinn für die Einsetzung von Enquete-Kommissionen liegt gerade darin, durch die intensive Beschäftigung mit dem Sachverhalt eingefahrene Denkmuster in Frage zu stellen.

Die Energiepolitik der letzten Jahre ist im wesentlichen der verfehlten Strategie der Ausweitung und ‚Risikostreuung‘ der Energieangebote gefolgt, anstatt die vorhandenen Einsparpotentiale konsequent zu nut-

zen und damit die Risiken abzubauen. Sie hat bis heute darauf verzichtet, durch eine aktive Umgestaltung der Energieversorgung die notwendigen neuen Strukturen zu schaffen, um die Bereitstellung von Energiedienstleistungen mit einem möglichst geringem Einsatz an nichterneuerbaren Energieträgern und die Mobilisierung der Energiesparpotentiale zu gewährleisten. Damit werden die vorhandenen Handlungsspielräume nicht genutzt, um ökologischen Erfordernissen und globalen Zusammenhängen Rechnung zu tragen.

Die o. g. Kommissionsmitglieder begrüßen alle Vorschläge und Empfehlungen, die von der Enquete-Kommission ‚Schutz der Erdatmosphäre‘ insgesamt getragen können. Sie sind ein wichtiger Beitrag, um in der Bundesrepublik die Stagnation in der Energie- und Umweltpolitik zu überwinden. Die Zustimmung hierzu kann aber nicht bedeuten, daß keine weitergehenden Forderungen vorgeschlagen werden.

Mit dem vorgelegten Votum wollen wir auch aufzeigen, daß die zukünftige Energiepolitik nicht nur grundlegende Änderungen in der Energieversorgung erforderlich macht, sondern in einem engen Zusammenhang mit weitreichenden Reformen in der Wirtschafts-, Technologie- und Gesellschaftspolitik stehen muß, wenn sie dauerhaft sozial- und umweltverträglich sein will. Die Empfehlungen müssen von daher diese systemaren Zusammenhänge der Energieversorgung beachten und gleichzeitig so konkret sein, daß die Zielvorgabe der Reduktion energiebedingter Emissionen um mindestens 30 Prozent bis zum Jahr 2005 tatsächlich erreicht werden kann.

Zusammenfassend wird der Koordinatorenbericht wie folgt bewertet:

#### a. Umfassende Bestandsaufnahme

Mit dem Studienpaket der Enquete-Kommission wurde eine in der Bundesrepublik bislang einmalige und umfassende Bestandsaufnahme der wissenschaftlichen Erkenntnisse über die „Möglichkeiten der Verminderung energiebedingter klimarelevanter Schadstoffe“ für die Bundesrepublik Deutschland vorgelegt werden. Wichtigste Ergebnisse sind:

- eine Kohlendioxid-Minderung von mindestens 30 Prozent bis zum Jahr 2005 (Basisjahr 1987) ist in der Bundesrepublik mit einer breiten Palette technischer, finanzieller und politischer Optionen möglich. Der Koordinatorenbericht erreicht z. B. für die Ausstiegsvarianten aus der Atomenergie eine CO<sub>2</sub>-Reduktion von 33,7 %;
- in jeder Variante einer Klimaschutzpolitik erbringt die rationelle Energienutzung den größten Beitrag. Eine vorsichtige Abschätzung und Aufsummierung der technisch heute gesicherten Einsparpotentiale in den Einzelstudien erbrachte ein Gesamteinsparpotential von 35 – 44 Prozent bezogen auf den Primärenergieverbrauch von 1987. Hinzu kommen weitere Einsparmöglichkeiten zwischen 5 und 15 Prozent durch einen bewußten Verzicht von Energieangeboten;

- wenn in der nächsten Legislaturperiode entscheidene Weichenstellungen erfolgen, kann der Einsatz der erneuerbaren Energiequellen schon mittelfristig erheblich gesteigert werden und im nächsten Jahrhundert eine entscheidende Rolle bei der Energiebedarfsdeckung einnehmen. Eine vorsichtige Abschätzung des technischen Gesamtpotentials aus den Einzelstudien ergab einen Anteil für die erneuerbaren Energiequellen von jeweils rd. 30 Prozent an der Nettostromerzeugung bzw. am Verbrauch von Niedertemperaturwärme (jeweils bezogen auf 1987);
- eine Politik zur Verminderung der Kohlendioxid-Emissionen ist mit und ohne Atomenergie technisch möglich. In der Kommission ist jedoch umstritten, ob der Ausstieg aus der Atomenergie eine Klimaschutzpolitik in der Bundesrepublik eher fördert oder erschwert und wie die heute bereits akuten Risiken der Atomenergie gegenüber den zukünftig möglichen globalen Risiken des zusätzlichen Treibhauseffekts bewertet werden sollen.
- eine Politik zum Schutz des Klimas erfordert bei jeder denkbaren Variante einschneidende Maßnahmen und eine Trendwende gegenüber der heutigen Energiepolitik. Dies gilt für alle drei diskutierten Varianten: Bei
  - weitgehend gleichbleibender Kernenergie-Kapazität,
  - Kernenergie-Ausbau und
  - Ausstieg aus der Kernenergie (bis 1995 bzw. 2005).

Alle drei Varianten zur Reduktion der Kohlendioxid-Emissionen sind jeweils mit unterschiedlichen, aber erheblichen energiepolitischen Eingriffen in das Energie- und Verkehrssystem, aber auch mit spezifischen Risiken verbunden. Mit diesen Eingriffen werden zugleich wichtige Weichenstellungen für die zukünftige Industrie- und Technologiepolitik vorgenommen. Jede eingriffslose ‚Laissez-faire-Politik‘ würde dagegen das angestrebte Einsparziel weit verfehlen (vergl. ISI/Prognos 1989) und zudem zukünftige Maßnahmen erheblich erschweren.

- die Eindämmung der Umwelt- und Klimakrise verlangt, daß die Politik ihre Verantwortung für die Erhaltung der natürlichen Lebensgrundlagen und den Fortgang der Zivilisation wahrnimmt. Das demokratisch legitimierte Primat der Politik muß für dieses Ziel auch gegen mächtige wirtschaftliche Interessen und egoistischen Verbandslobbyismus durchgesetzt werden.

### b. Diskursiver Forschungs- und Beratungsprozeß

Die Auftragsvergabe an die Forschungsinstitute und die Bearbeitung des Studienpakets durch die Enquete-Kommission sowie die (teilweise) Berücksichtigung konkurrierender methodischer Ansätze und unterschiedlicher energiewirtschaftlicher Konzepte sind neu in der energiewissenschaftlichen Forschung der Bundesrepublik. Wir begrüßen diesen Ansatz. Er

sollte weiterverfolgt und vertieft werden, weil eine zukunftsfähige neue Energiepolitik nicht nur alle innovativen Anstöße und Ideen einbeziehen muß, sondern auch auf einen möglichst intensiven wissenschaftlichen Diskurs und die demokratische Herausbildung eines breiten Konsens angewiesen ist.

Klimaschutzpolitik ist längerfristige Vorsorgepolitik, die nicht durch ständig wechselnde politische Meinungen und kurzfristige Orientierungen immer wieder in Frage gestellt werden darf. Eine transparente und diskursive Form der wissenschaftlichen Politikberatung ist eine wesentliche Voraussetzung für eine erfolgreiche Klimaschutzpolitik. Dazu müssen – entsprechend der breit gefächerten Diskussion in der Öffentlichkeit – die unterschiedlichen Strategien gleichberechtigt aufgezeigt und bewertet werden. Hierin liegen wichtige Voraussetzungen für eine Energiepolitik, die sich gegen starke Partialinteressen durchsetzen muß.

### c. Hohe Arbeitsbelastung und starker Zeitdruck

Die Kommission sowie die beteiligten Institute und Projektleiter haben unter großem Zeitdruck ein enormes Arbeitspensum abgearbeitet. Wir danken vor allem den Koordinatoren des Energieberichts, die engagiert und weit über die sonst üblichen Belastungen hinaus für die Erstellung der Vorlage des Energieberichts gearbeitet haben. Dennoch fehlten zeitliche und organisatorische Voraussetzungen, um die bereits sehr aufwendigen und arbeitsintensiven Abstimmungen noch weiter im Sinne einer diskursiven Willensbildung zu vertiefen. Weder unter den Koordinatoren noch zwischen der Koordinatorengruppe und der Kommission konnten alle kontroversen Fragen diskutiert werden. Eine derartige, neu einzuübende ‚produktive Streitkultur‘ ist sehr zeitaufwendig und erfordert einen veränderten Arbeits- und Bewertungsstil.

Bei dem engen Zeitrahmen konnten darüber hinaus keine eigenständigen zusätzlichen Forschungsarbeiten sowie keine zusammenfassende, die Einzelstudien integrierende Systemanalyse angefertigt werden. Der Energiebericht beruht daher auf unterschiedlich belastbaren Basisdaten, so ist z. B. die Datenbasis über die Technologien und Kosten effizienterer Energienutzung in der Industrie und im Kleinverbrauch noch zu wenig aufgearbeitet.

### d. Umfassender Kriterienkatalog notwendig

Die Erkenntnis sozialwissenschaftlicher Forschung, daß die Entwicklung von Technik ein sozialbestimmter Prozeß ist, in den unterschiedliche, vor allem wirtschaftliche Interessen, gesellschaftliche Akzeptanzfragen und kulturelle Werthaltungen einfließen, konnte noch nicht ausreichend berücksichtigt werden. Die Entwicklung der Technik steht aber immer wieder in ‚Verzweigungssituationen‘, die unterschiedliche Zukunftspfade ermöglichen. Durch die spezifische Arbeitsteilung zwischen Technikgenese und den wirtschaftlichen Interessen bei der Umsetzung wird die Vielfalt der Optionen von vorneherein

verengt. Hier besteht ein politisches Gestaltungsdefizit. Bei der Bewertung der einzelnen Optionen und Pfade einer Klimaschutzpolitik müssen aber auch die Risiken und Folgen für andere gesellschaftlichen Bereiche berücksichtigt werden.

Es ist Aufgabe der Politik, anhand von qualitativen Kriterien einen insgesamt risikomindernden Pfad gesellschaftlicher Entwicklung zu verfolgen. Entsprechend ihrem Auftrag hat die Enquete-Kommission vorrangig Neuorientierung und Umstrukturierung des Energie- und Verkehrssystems nach dem Kriterium ‚Klimaverträglichkeit‘ untersucht, d. h. nach den „Möglichkeiten der Verminderung klimarelevanter Schadstoffe“. Neben den ermittelten technisch und theoretisch möglichen Minderungspotentialen konnten z. B. nur erste vorläufige wirtschaftliche Kosten- und Nutzenüberlegungen angestellt werden. Weitere wichtige Kriterien, wie z. B. ausreichende Versorgung, Versorgungssicherheit, Gefährdungssicherheit, Sozialverträglichkeit, internationale Verträglichkeit, Handlungsfreiheit, Wandlungsfähigkeit, Gerechtigkeit (vergl. Enquete-Kommission ‚Zukünftige Kernenergie-Politik‘) konnten bisher nur am Rande berücksichtigt werden.

Auch die sozialen sowie gesamt- und regionalwirtschaftlichen Auswirkungen unterschiedlicher Strategien zur Reduktion von Kohlendioxid-Emissionen (z.B. auf die ‚Kohleländer‘, Netto-Beschäftigung, Technologieentwicklung oder Netto-Exportsituation) konnten noch nicht analysiert werden.

## Konsequenz

Schon jetzt kann ein Handlungsprogramm mit robusten Maßnahmen zum Schutz des Klimas empfohlen und umgesetzt werden. Dennoch ist die Enquete-Kommission noch nicht in der Lage, eine industrie-, sozial- und umweltpolitisch abgestimmte Gesamtstrategie für die zukünftige Energie- und Verkehrspolitik vorzulegen. Insofern sind in der nächsten Legislaturperiode weiterführende Forschungsarbeiten und eine Fortsetzung des begonnenen diskursiven Prozesses notwendig, damit eine von kurzfristigen politischen Mehrheiten so weit wie möglich unabhängige und zukunftsfähige Energie- und Verkehrspolitik umgesetzt und fortgeschrieben werden kann.

## II. Ausgewählte Kritikpunkte

Mit den folgenden 9 Kritikpunkten am Energiebericht der Koordinatoren sollen die Übereinstimmungen und Kontroversen differenziert herausgearbeitet sowie die unterschiedlichen Standpunkte und Interessen transparent gemacht werden.

### 1. Unausgewogene Darstellung der Varianten

Dem optimalen Anspruch einer diskursiven Analyse und Bewertung unterschiedlicher energiepolitischer Varianten hätte entsprochen

- für jede Variante das Pro und Contra fair und ausgewogen darzustellen,
- die Ausstiegsvarianten (bis 1995 und bis 2005) ebenso ausführlich zu untersuchen, wie die beiden anderen Strategien,
- für alle drei Varianten nicht nur die eindimensionale Zielorientierung „technisch machbare CO<sub>2</sub>-Reduktionsquote“, sondern auch absehbare gesellschaftliche Folgewirkungen und mögliche Zielkonflikte (z. B. Minderung oder Steigerung externer Effekte, Auswirkungen auf die Kohleverstromung, gesellschaftliche Akzeptanz, Verstärkung oder Abbau vorhandener Innovations- und Investitionsblockaden, Konsequenzen für die Struktur der Energiewirtschaft) nach möglichst einem einheitlichen Kriterienraster darzustellen.

Dieser Anspruch konnte nicht eingelöst werden. Subjektive Bewertungen einzelner Koordinatoren nehmen einen großen Raum ein. Der Bericht geht überwiegend von einer Grundannahme aus, die weder explizit offengelegt noch begründet wird: Implizit wird vorausgesetzt, daß die Reduktionsstrategie mit konstanter Atomenergiekapazität die realistischste CO<sub>2</sub>-Reduktionsstrategie sei. Die Varianten sind nicht gleichrangig vertreten, die Ausstiegs-Varianten werden eher als realitätsferne Optionen behandelt, während die Ausbau-Variante einseitig von einem Befürworter konzipiert ist. Dies erschwert eine objektive Darstellung und faire Würdigung der technisch möglichen Reduktions-Pfade.

### 2. Strukturelle Hemmnisse vernachlässigt

Nach den Ergebnissen des Studienprogramms kann nicht mehr bestritten werden, daß das technische Potential rationellerer Energienutzung und erneuerbarer Energiequellen ausreichen würde, um in der Bundesrepublik eine CO<sub>2</sub>-Minderung von 30 Prozent bis zum Jahr 2005 ohne Nutzung der Atomenergie zu verwirklichen. Geht man von der Notwendigkeit einer insgesamt risikominimierenden Energiepolitik aus, kann nicht mehr die Atomenergie selbst der zentrale Streitpunkt sein, sondern die Frage, ob und in welchen Zeiträumen die umfangreichen technischen Potentiale für eine sichere Energieversorgung ohne Atomkraft auch realisiert werden können und welche wirtschaftlichen und politischen Konsequenzen damit verbunden sind.

Der Hemmnisanalyse, die im Studienprogramm wie auch im Energiebericht der Koordinatoren zu Recht einen breiten Raum einnimmt, kommt dabei eine entscheidende Bedeutung zu. Die vorliegende Hemmnisanalyse bringt in zahlreichen Detailfragen einen erheblichen Erkenntnisfortschritt in Hinblick sowohl auf das notwendige Instrumentenmix wie auch das sektorspezifische Maßnahmenbündel für eine Umsetzungsstrategie. Sie kann aber dennoch in einigen wichtigen Punkten noch nicht befriedigen. Die Mängel sind:

Erstens werden die Hemmnisse bei der Markteinführung innovativer Techniken auf der Angebotsseite im Vergleich zur Nachfrageseite nicht differenziert ge-

nug behandelt. Die wesentlichen Unterschiede der Hemmnisse bei direktem Wettbewerb (zwischen Energieträgern bzw. zwischen Angebotstechniken) gegenüber denen bei Substitutionswettbewerb (zwischen Energie und rationellerer Energienutzung durch Einsatz von Kapital und Wissen) werden nicht eindeutig herausgearbeitet. Der vorrangige ‚Flankenschutz‘ zugunsten der rationellen Energienutzung durch verstärkte strukturelle sowie ordnungs-, energie- und forschungspolitische Maßnahmen wird daher noch zu wenig berücksichtigt.

Zweitens werden die Hemmnisse vernachlässigt, die sich aus der zentralisierten und monopolistischen Angebotsstruktur, der absatzorientierten Unternehmenspolitik der Energieversorgungsunternehmen und den Überkapazitäten bei der Stromerzeugung ergeben. Dennoch wird – selbst bei der ‚Ausbau-Variante‘ – vorausgesetzt, daß „alle bestehenden Hemmnisse abgebaut (seien)“ (S.92). Bei der Darstellung der „zielgruppenübergreifenden Hemmnisse und Maßnahmen“ werden die für Geschwindigkeit und Umfang der Markteinführung von Kraft-Wärme-Koppelung (KWK) und Regenerative entscheidend wichtigen strukturellen Hemmnisse auf dem Strommarkt jedoch fast vollständig ausgeklammert. (Auch der Wärmemarkt hängt direkt – bei elektrischer Heizung und Warmwasserbereitung – und indirekt – bei der Substitution konventioneller Heizsysteme durch Nah- und Fernwärme aus Kraft-Wärme-Koppelung (KWK) von der Angebotsstruktur des Strommarkts ab.)

Drittens wurden die spezifische ökonomische Logik und Entwicklungsdynamik der jeweiligen Szenarienkonstruktion nicht untersucht. Stattdessen wurde ‚technokratisch‘ unterstellt, daß die Systemkomponenten für die Erzeugung von Elektrizität sowie von Nah- und Fernwärme – also Atomenergie, traditionelle fossile Stromerzeugung, KWK, Regenerative und Effizienz – beliebig kombinierbar sind.

Obwohl z. B. die ‚Energiespar‘-Variante als zwar politikintensive, aber gleichwohl realistische Option eingeschätzt wird, ist sie im Zusammenhang mit der Ausstiegs-Option als mehr oder weniger wirklichkeitsfremd dargestellt. Daß durch den Ausstieg jedoch ein neuer rentabler Markt für CO<sub>2</sub>-Reduktionstechniken entstehen und damit ein beträchtlicher Investitionschub ausgelöst werden kann, wird nur sehr vage angedeutet (S.111).

Aus diesen methodischen Mängeln der Hemmnisanalyse resultiert, daß die Entwicklungsvarianten ‚moderat‘ bis ‚Energiespar‘ unabhängig von den bestehenden strukturellen Hemmnissen des Systems der leistungsgebundenen Energiewirtschaft (insbesondere des Stromsektors) formuliert wurden. Implizit wird damit von der Annahme ausgegangen, daß die Realisierungschancen der technischen Potentiale für mehr Effizienz, Regenerative und KWK unabhängig sind von der Entwicklungs- und Funktionslogik des großtechnischen Kraftwerks- und Verbundsystems sowie von den bestehenden großen (Über-) Kapazitäten, (die auf mindestens 10 GW geschätzt werden). Gegen diese Annahme sprechen zahlreiche theoretische Argumente (vergl. hierzu z. B. IIASA 1982; Hennische et al 1986; Schefold 1987; Elektrowatt 1989; Hennische

1989; Nitsch/Luther 1990), auf die im Punkt 9 genauer eingegangen wird.

Empirisch lassen sich die strukturellen Hemmnisse und die Innovations- und Investitionsblockade auf dem Strommarkt vor allem an zwei aktuellen Tendenzen festmachen:

- a) die potentiellen Großinvestoren (Verbund-Energieversorgungsunternehmen und große Regionalanbieter) diversifizieren in neue Branchen (z. B. in Müllverbrennung, ins Öl- und Gasgeschäft) statt – in einem vergleichbaren Maßstab – in mehr KWK, erneuerbare Energiequellen oder gar in die Mobilisierung von Einsparpotentialen zu investieren.
- b) Potentielle kommunale und/oder industrielle Newcomer für KWK (laut Annahme im Energiebericht: „Weit unter 100 MW el“; vergl. S.37) oder erneuerbare Energiequellen werden durch zahlreiche Behinderungen (z. B. ‚Lockvogel‘-Angebote in Konzessions- und Lieferverträgen; geringe Einspeisevergütungen; Disparität der Rentabilitätskalküle) vom Marktzugang abgehalten. Diese dezentralen Newcomer sind aber – im Gegensatz zu den bisherigen Angebotsmonopolisten – für die Markteinführung zahlreicher CO<sub>2</sub>-Reduktionspotentiale besonders geeignet (vergl. für die Regenerativen z. B. Nitsch/Luther 1990).

Der notwendige Umbau zu einer dezentraleren Angebotsstruktur und die dann auftretenden Widersprüche zur Annahme einer unverändert zentralisierten Atom- bzw. Gas-Kraftwerks-Kapazität (im Szenario ‚Energiepolitik‘) werden im Abschnitt ‚erneuerbare Energiequellen‘ (3.3.) nur indirekt angesprochen. Z.B. werden

- „die strukturellen und stromspezifischen Hemmnisse“ insbesondere für die dezentralen, netzgekoppelten Systeme (und diese überwiegen in der ersten entscheidenden Stufe der Markteinführung),
- „die Existenz heute noch bestehender Überkapazitäten“ (S. 80),
- die Wechselwirkung zwischen dezentraler Einführung und forciertem Aufbau von Produktionskapazitäten für Photovoltaik- (PV) und Windkraft-Anlagen sowie die dafür notwendige massive energiepolitische Unterstützung bzw. Weichenstellung und der Zeitbedarf für den Aufbau von Produktionskapazitäten und Markt-einführung im großen Stil,

erwähnt, ohne hieraus bei der technischen Komposition der Szenarien ‚Energiepolitik‘ und ‚Kernenergieausbau‘ die notwendigen Konsequenzen zu ziehen. Im Szenario ‚Energiepolitik‘ wird z. B. für die Einführung erneuerbarer Energiequellen vorausgesetzt, daß „alle wirtschaftlichen Potentiale nach Abbau der bestehenden Innovationshemmnisse weitgehend realisiert werden können“ (S.93).

Weiterhin wird die Wirkung der strukturellen Hemmnisse z. B. für die forcierte Markteinführung von Techniken rationellerer Stromnutzung (in allen Varianten werden die gleichen Investitionen für Haushaltsgeräte/Beleuchtung unterstellt, S.46) und vor allem auch

der Kraft-Wärme-Koppelung weitgehend ausgeklammert, obwohl gerade diese Hemmnisse im Einzelbericht zur Kraft-Wärme-Koppelung (Traube 1989) herausgearbeitet worden sind (vergl. auch Punkt 8).

### 3. ‚Gegen den Weltmarkt steuern‘

Die Analyse der zukünftigen Mengen- und Preisentwicklung auf den Weltmärkten für Primärenergie ist von großer Bedeutung, um zentrale Rahmendaten für nationale Energiestrategien abzuleiten. Die Frage nach der Reichweite der Ressourcen, langfristigen Preisentwicklung von Öl, Erdgas und Steinkohle sowie nach der Rolle von Anbieterkoalitionen (wie z. B. der OPEC) stellt sich allerdings im Kontext einer weltweiten Klimaschutzpolitik vollständig neu. Die bisherigen Erklärungsansätze müssen gründlich überdacht werden. Auf diese sehr komplexe Problematik konnte das Studienprogramm in der kurzen Untersuchungszeit noch keine erschöpfende Antwort geben. Allerdings spiegeln die im Koordinatorenbericht eingearbeiteten Prämissen und Annahmen fast ausschließlich die traditionelle Betrachtungsweise wieder und können wegen der Nichtbeachtung neuer Rahmenbedingungen zu falschen Schlußfolgerungen verleiten.

So beruht das Analyseraster vor allem auf der Einschätzung, daß durch eine weltweite Klimastabilisierungspolitik und die hierdurch reduzierte Nachfrage nach fossilen Energieträgern der Trend zu erneut steigenden Ölpreisen zumindest abgeschwächt werden wird; die Preise für Erdgas dagegen, so wird vermutet, werden überproportional steigen, weil Erdgas wegen seines relativ geringeren Kohlenstoffgehalts vorübergehend als Substitut für Kohle und Öl verwendet werden wird. Diese Argumentation beruht jedoch auf einer partialanalytischen Betrachtung, die den komplexen Interdependenzen einer Klimaschutzpolitik nicht gerecht wird. So erscheint auch die gegenteilige These mindestens ebenso plausibel: Ohne erheblich steigende Primärenergiepreise wird es keine erfolgreiche Klimastabilisierungspolitik geben.

In diesem Votum können nur einige Aspekte diskutiert werden, welche Auswirkungen eine Klimaschutzpolitik auf den Weltmarktleitpreis für Öl sowie auf die Preise von Weltmarktkohle und Erdgas haben könnten. Folgende Punkte sind von besonderer Bedeutung:

- Eine globale Reduzierung der nachgefragten Menge durch eine CO<sub>2</sub>-Reduktionspolitik wirkt nur unter bestimmten Bedingungen in Richtung sinkender Ölpreise. Bei einer entsprechenden Mengenregulierung des Angebots können die Preise stagnieren oder ansteigen. Mengen und Umsätze auf den Energiemärkten müssen also unterschieden werden.
- In der Realität erscheint eine erfolgreiche Klimastabilisierungspolitik nur bei einer entsprechend abgestimmten Mengenregulierung durch die hauptsächlichen Weltmarktanbieter und bei steigenden Preisen politisch durchsetzbar. Dies betrifft sowohl die notwendige Kompensation der Eigentümerstaaten als auch die erforderliche pre-

tielle Lenkungswirkung in den Verbraucherländern. Die OPEC würde z. B. wohl kaum einer internationalen Konvention beitreten, die ihr zumutet, jedes Jahr weniger Öl zu sinkenden Preisen zu verkaufen. Hieraus folgt:

- a) Eine weltweite Regulierung des Primärenergie-Angebots ist notwendig, damit der erforderliche Reduktionsfahrplan auch tatsächlich eingehalten wird. Um die Eigentümer-Staaten für diese Politik zu gewinnen, müssen die ausfallenden Erlöse in Folge sinkender Mengen durch entsprechende Preiserhöhungen ausgeglichen werden. Legt man z. B. als möglichen Ausstiegspfad eine Mengenreduktion für Öl um 85 Prozent bis zum Jahr 2100 zugrunde, würde also die Reichweite des Öleinsatzes noch über das gesamte nächste Jahrhundert ausgedehnt, dann müßten die Ölpreise in diesem Zeitraum allein zur Stabilisierung der nominellen Umsätze durchschnittlich um 0,7 Prozent pro Jahr steigen.
- b) Während bisher der Ölpreis eine Leitpreisfunktion auf den Weltenergie-Märkten gespielt hat, an den insbesondere die Erdgaspreise auf allen Marktstufen durch Preisgleitklauseln ‚angelegt‘ werden, könnte sich dies im Rahmen einer Klimastabilisierungspolitik ändern. Spielten die unterschiedliche Reichweite der Ressourcen und wirtschaftliche Faktoren keine Rolle, müßten – gemessen am Ausmaß der Klimagefährdung – zunächst die Braunkohle, dann die Steinkohle, das Erdöl und erst zuletzt das Erdgas durch kohlenstofffreie oder weniger kohlenstoffhaltige Brennstoffe ersetzt werden. Die zum Ölmarkt komplementäre Mengen- und Preisregulierung für Erdgas und Steinkohle könnte dann wie folgt aussehen: Da Erdgas während der ersten Phase der Klimaschutzpolitik eher ausgeweitet werden muß – also als ‚Brücke‘ zur ‚Sonnenergie-Wirtschaft‘ an Bedeutung gewinnt – müßten die Preiserhöhungen relativ gering bleiben und daher vermutlich von der bisherigen Ölpreisbindung abgekoppelt werden: Dagegen müßten die Kohlepreise überproportional steigen, um den Kohleabsatz stärker zu reduzieren.
- c) Eine der schwierigsten Aufgaben ist daher die Regulierung eines international abgestimmten Reduktionsfahrplans zwischen den einzelnen fossilen Energieträgern, weil hiervon nicht nur die noch tolerablen Gesamtemissionen an CO<sub>2</sub> abhängen, sondern auch Eigentümerstaaten mit vollständig unterschiedlichem Entwicklungsniveau und widersprüchlicher Interessenslage betroffen sind. So zeigt z.B. die nachfolgende Tabelle, daß die wirtschaftlich gewinnbaren Vorräte für fossile Energieträger weltweit einerseits höchst ungleich verteilt sind; andererseits steht diese Verteilung bei einigen Ländern in krassem Gegensatz sowohl zu ihrer voraussichtlichen Bereitschaft als auch zu ihren ökonomischen Möglichkeiten, aus eigener Kraft auf die klimaunverträgliche Nutzung ihrer inländischen Ressourcen zu verzichten.

Tabelle 1

**CO<sub>2</sub>-Emissionen und Vorräte fossiler Energieträger  
nach ausgewählten Emittenten- und Eigentümerstaaten**

	Kohlenstoff-Emissionen (1986)		Wirtschaftlich gewinnbare Vorräte (1986)					
			Kohle		Öl		Erdgas	
	Platz (1)	in Mio. t	Mrd. t SKE	in % (2)	Mrd. t	in % (2)	1000 Mrd. qm	in % (2)
USA .....	1	1 201,6	225,7	28,8	3,3	3,1	5,3	5,1
UdSSR .....	2	1 010,8	172,3	22,0	10,6	9,8	43,9	42,7
China .....	3	554,4	100,5	12,8	2,5	2,3	0,9	0,8
Japan .....	4	256,1	1,0	0,1	—	—	—	—
BRD .....	5	186,3	43,5	4,4	0,3	0,3	0,2	0,2
Indien .....	7	144,3	21,9	2,8	0,6	0,5	0,5	0,5
Polen .....	8	124,5	32,6	4,2	—	—	0,1	0,1
DDR .....	12	92,3	6,3	0,8	—	—	—	—
Südafrika .....	13	92,5	58,4	7,5	—	—	—	—
CFSR .....	15	65,8	4,4	0,6	—	—	—	—
Naher Osten .....			1,7	0,2	55,8	51,6	26,2	25,6
Insgesamt .....		5 375,0	782,3	100,0	108,1	100,0	102,8	100,0

(1) Rangfolge gemessen am Anteil der jeweiligen Kohlenstoffemissionen aus der Verbrennung fossiler Energieträger an den Gesamtemissionen (nach Edmonds/Barns 1990)

(2) Anteil an den jeweiligen wirtschaftlich gewinnbaren Vorräten in der Welt

Quelle: Weltenergiekonferenz; Oil and Gas Journal; Edmonds/Barns 1990

Die Tabelle zeigt, daß z. B. für China und Indien der Einsatz von Kohle als einziger im Inland verfügbarer fossiler Energieträger für die eigene Entwicklung unverzichtbar ist. Dies wird nur beim Einsatz der effizientesten Kohletechniken keine katastrophalen Auswirkungen auf das Weltklima haben.

Es wird auch aus ökologischen Gründen notwendig sein, daß insbesondere reiche Kohle-Eigentümerstaaten wie USA und Bundesrepublik, aber auch die Sowjetunion eine Vorreiterrolle bei der Forschung und Entwicklung für modernste Kohle-Heizkraftwerke sowie für den Technologietransfer in „Problem“-Länder einnehmen.

Ein freiwilliger Verzicht auf die eigene Nutzung oder den Export zumindest eines Teils ihrer Kohlereserven erscheint zudem nur bei entsprechenden Kompensationszahlungen an die Nur-Kohle-Eigentümerstaaten (wozu z. B. auch Polen und Südafrika gehören,) vorstellbar.

Dies gilt in noch höherem Maße z. B. für die Nah-Ost-Länder, die mehr als die Hälfte der weltweiten Öl-Reserven bzw. mehr als ein Viertel der Erdgas-Reserven besitzen und aus deren Export ihre Entwicklung finanziert. Ohne eine Kompensation durch höherer Preise wird ein klimaverträgliche Reduzierung der Öl- und mit-

telfristig auch der Erdgasmengen kaum möglich sein.

- d) Wenn die Weltmarktpreise der international gehandelten Primärenergieträger nur um den Prozentsatz der erforderlichen jährlichen Mengenreduzierung angehoben würden, könnten zwar die Erlöse der jeweiligen Eigentümerstaaten stabilisiert werden, aber der Anreiz und die Steuerungswirkung für Energiesparmaßnahmen sowie für die Markteinführung der Regenerativen wäre viel zu gering. Eine erste globale, wenn auch noch sehr grobe Computersimulation kommt z. B. zu den Ergebnis, daß für eine ausschließlich pretial gesteuerte Reduktion der CO<sub>2</sub>-Emissionen um 50 % bis zum Jahr 2025 ein beträchtlicher CO<sub>2</sub>-Steueraufschlag für Endverbraucher, für Energieversorgungsunternehmen (EVU) und für Produzenten notwendig wäre, der bis 2025 auf folgende Höhe ansteigen müßte (20):

- flüssige Brennstoffe 1,73 US \$/GJ
- Erdgas 1,20 US \$/GJ
- Kohlen 2,10 US \$/GJ

(Zum Vergleich: Der Ölpreis steigt im Referenzszenario ohne Steuer von 2 US \$/GJ bis 2025 etwa auf das Doppelte.)

Bei dieser Methode der Steuererhebung auf die Produzenten, EVU und Endverbraucher ergibt sich

einerseits eine Kumulierung der Steuerwirkung und andererseits wird den Interessen von Eigentümer- und Verbraucherstaaten durch eine formale Gleichverteilung der Steuererlöse von Anfang an Rechnung getragen. Ob die Eigentümerstaaten damit zufrieden sein werden, bleibt allerdings offen.

Weiterhin stellt sich die Frage, ob mit diesen Steueraufschlägen eine ausreichende Internalisierung der externen Kosten gewährleistet ist. Wenn die Verbraucherstaaten eine Internalisierung mit einer zusätzlichen Energieabgabe vornehmen wollen, geben sie damit der OPEC ein Signal, daß sie ihren Preiserhöhungsspielraum noch nicht ausgeschöpft hat. Es stellt sich also generell die politisch brisante Frage nach der Verteilung der absoluten Rendite und der Differentialrenten aus dem Primärenergieverkauf auf die Eigentümer- und Verbraucher-Staaten.

Vollständig ungeklärt ist schließlich, wie die Interessen der Länder der Dritten Welt ohne eigene Primärenergievorkommen berücksichtigt werden können. Diese Länder wären in wirtschaftlicher Hinsicht die eigentlichen Opfer einer zur Klimastabilisierung unabdingbaren Preiserhöhungspolitik auf fossile Energieträger. Ihre Lage würde sich dramatisch zuspitzen. Es könnte sich daher als notwendig erweisen, zumindest einen Teil der Erlöse aus der weltweit regulierten Preisanpassung für fossile Energieträger zweckgebunden zur Finanzierung eines Technologietransfers für diesen Teil der Dritten Welt und die Ärmsten der Armen zu verwenden. Aber wer setzt dies durch und wer kontrolliert die Verwendung?

Mithin läßt sich zusammenfassen: Es wird für eine CO<sub>2</sub>-Minderungspolitik nicht ausreichen auf jeweils nationaler Ebene durch die Internalisierung der externen Kosten ‚gegen den Weltmarkt zu steuern‘. Auf der Tagesordnung steht die Regulierung des Weltmarkts selbst für die fossilen Energieträger. Notwendig ist nicht nur eine internationale Konvention zur Festlegung der Reduktionspflichten beim Einsatz fossiler Energieträger (also die Regulierung der Nachfrage), sondern auch eine weltweite, globale Regulierung des Energieangebots und eine Kompensationslösung zugunsten der Eigentümer-Länder. Zur erfolgreichen Umsetzung einer zumindest teilweise marktgesteuerten Klimaschutzpolitik muß das Energiepreisniveau international wie national wahrscheinlich weit höher liegen, als das im Energiebericht angenommen ist. Hierbei allein auf die Selbststeuerungsfähigkeit des ‚Markts‘ zu vertrauen, wäre mit Sicherheit eine Illusion.

#### 4. Nicht nachvollziehbare Preisannahmen

Neben der Annahmen über die Entwicklung der Weltmarktpreise ist das inländische Energiepreisniveau sicherlich eine zentrale Determinante der Klimaschutzpolitik. Im Koordinatorenbericht werden vier unterschiedliche Preisannahmen gemacht:

- bei der Untervariante ‚moderat‘ sowie bei der Errechnung der Netto-Investitionskosten werden die Preise des Analyserasters (Auszug auf S.19) unterstellt,
- beim Referenzszenario (vergl. S.207) nach ISI/Prognos (1989) werden bis auf 15 Prozent bis zum Jahr 2005 ansteigende Preisaufschläge auf die Erzeuger- bzw. Verbraucherpreise für fossile Energieträger unterstellt (prozentual weniger für Strom und Fernwärme),
- in der Untervariante ‚Energiepolitik‘ werden die Preise für Endenergie bei Brennstoffen und Fernwärme um 5 DM/GJ und für Strom um 2Pf/KWh angehoben,
- in der Untervariante ‚Energiespar‘ werden die Preise für Endenergie bei Brennstoffen und Fernwärme um 15 DM/GJ und für Strom um 7 Pf/KWh angehoben.

Diese unterschiedlichen Preisannahmen sind nur schwer durchschaubar und führen zu einer Reihe von Widersprüchen. Damit aus dem vorliegenden Bericht jedoch keine falschen Schlüsse gezogen werden, sind folgende Anmerkungen notwendig;

#### a. Keine differenzierten Wirkungsanalysen bisher möglich

Höhe und Struktur der preispolitischen Maßnahmen beruhen nicht auf differenzierten Wirkungsanalysen, dürfen von daher nicht als konkrete Steuervorschläge mißverstanden werden und lassen sich nur als methodische Hilfsmittel für eine verstärkt pretial gesteuerte Energiepolitik interpretieren; z. B. ist die angenommene Belastung der Nah- und Fernwärme mit 5 DM/GJ in Hinblick auf den gleichzeitig unterstellten Hemmnisabbau für KWK-Systeme wenig zielführend.

Hinsichtlich der Kohleverstromung würde sich dann eine Diskriminierung ergeben, wenn der Aufschlag von 5 DM/GJ als Primärenergiesteuer mißverstanden würde: Dieser Aufschlag würde bei Steinkohle (entspricht 146 DM t SKE) selbst bei einem Wirkungsgrad von 40 Prozent zu einer überproportionalen Strompreis-erhöhung von 4,5 Pf/ kWh (verglichen mit nur 2Pf/kWh bei Strom aus Atomenergie) führen.

Hinzu kommt, daß die unterstellten Preiserhöhungen volkswirtschaftlich vollständig unterschiedliche Wirkungen hervorrufen, ob sie

- a) aus im Inland erhobenen und zweckgebunden verwendeten Abgaben resultieren (langfristig nur eine Reallokation der Ressourcen),
- b) in Form einer Steuer – ohne zweckgebundene Verwendung – ins allgemeine Steueraufkommen abfließen (geringerer Lenkungseffekt) oder
- c) allein durch Preiserhöhungen auf dem Weltmarkt ausgelöst sind (Ressurcentransfer ans Ausland).

Die für die Bundesrepublik volkswirtschaftlich günstigste, wenn auch wenig wahrscheinliche (siehe Punkt 3) Entwicklung wäre sicherlich, wenn – bei nur moderaten Steigerungsraten auf dem Welt-

markt — das inländische Preisniveau durch eine Energieabgabe (entsprechend der vermiedenen externen Kosten) angehoben und diese Mittel zweckgebunden zur beschleunigten Markteinführung von Technologien rationeller Energienutzung sowie erneuerbaren Energiequellen verwendet werden würden.

## b. Überhöhter Preisaufschlag in der ‚Energiespar‘-Variante

Eine weitere Inkonsistenz zwischen den (Preis-) Annahmen und der unterstellten Energieeinsparung in den unterschiedlichen Varianten konnte im Bericht nicht mehr bereinigt werden:

Beim Übergang von ‚Hemmnisabbau‘ zur Variante ‚Energiepolitik‘ wird einer Preiserhöhung von 5 DM/GJ bzw. 2 Pf/kWh eine (End-) Energieeinsparung von rd. 280 PJ zugerechnet. Eine Verdreifachung der Preisanhebung auf 15 DM/GJ und 7 Pf/kWh induziert dagegen im Übergang zur ‚Energiespar‘-Variante nur noch zusätzlich 267 PJ. Dieses Mißverhältnis zwischen dem zusätzlichen hohen Preisanreiz und der geringeren Einsparwirkung kann nicht allein auf steigende Grenzkosten zurückgeführt werden.

Nach Tabelle 3.2.2. (S.37) des Berichts werden — trotz der starken Preisanhebung auf 15 DM/GJ bzw. 7 Pf/kWh — im Sektor Verkehr (rd. 90 PJ), im Sektor Raumwärme ( rd. 90 PJ ), im Sektor Kleinverbrauch (rd. 80 PJ) und im Sektor Industrie (rd. 60 PJ) auch sektorspezifisch geringe preisinduzierten Einsparungen, dagegen beim Warmwasser (wegen der Umstellung auf zentrale solare Versorgung) sogar ein Zuwachs von rd. 70 PJ unterstellt.

Auch im Raumwärmebereich ist der überhöhte Preis aufschlag und die hierdurch induzierte Energieeinsparung trotz der — von Institut Wohnen und Umwelt (IWU) bezweifelten — extrem steigenden Grenzkosten für Neubauten wenig plausibel. So errechnet sich z. B. im Neubau für den Übergang zur ‚Hemmnisabbau-Variante‘ gegenüber dem bisherigen Durchschnitt eine Einsparung von 36 kWh/qm/a und für den Übergang zur ‚Energiepolitik‘-Variante weitere 36 kWh/qm/a, aber bei einer Verdreifachung der Preise für die ‚Energiespar‘-Variante nur noch von zusätzlich 8 kWh/qm/a.

Die überhöhten Preisannahmen für die ‚Energiespar‘-Variante sind aus der Entstehungsgeschichte der Szenarien erklärbar: In der ersten Fassung des Koordinatorenberichts war von diesen überhöhten Preisannahmen deshalb ausgegangen worden, weil der Effekt eines Hemmnisabbaus gegenüber dem von Preisanhebungen zunächst nicht ausdrücklich ausgewiesen war. Nachdem dann richtigerweise der überwiegende (wenn auch schwer exakt quantifizierbare) Effekt eines Hemmnisabbaus eingeführt worden war, hätte bei einer erneuten Überarbeitung die anfänglich zu hoch angesetzte Preisanhebung für die Variante ‚Energiespar‘ herabgesetzt werden müssen.

Wie ein Rückblick auf die bisherige Energiekostenrechnung der Bundesrepublik zeigt, wäre im übrigen eine zusätzliche Preiserhöhung in der Größenordnung von 5 — 7 DM/GJ durchaus volkswirtschaftlich ver-

tretbar: Zwischen 1985 und 1988 sind z. B. die Ausgaben der Bundesrepublik für den Import fossiler Primärenergieträger — bei fast unverändertem Importvolumen von 236 Mio. t SKE (1988) — um fast 50 Mrd. DM gesunken. Dies entspricht einem Preisrückgang von etwa 213 DM t/SKE bzw. von 7 DM/GJ Bundesrepublik (ohne erneuerbare Energiequellen). Die angenommene Erhöhung ergäbe ein Aufkommen (1988) von rd. 80 Mrd. DM (davon etwa 10 Mrd. auf Kernbrennstoffe und 20 Mrd. DM auf inländische Primärenergieträger).

## 5. Ungereimtheiten bei der Potentialermittlung

### 5.1. Einsparpotentiale

#### a) Industrie

Im Bereich Industrie erstaunt das geringe Einsparpotential. Selbst im Raumwärmebereich ergibt sich in diesem Sektor ein weit geringeres Einsparpotential als bei den Haushalten. Hierfür gibt es folgende Gründe:

Erstens ist die Datenbasis gerade für die komplexen Maßnahmen und Technologien der rationellen Energieverwendung in der Industrie unzureichend. Das Fehlen einer konsequenten Einsparforschung zeigt sich exemplarisch am Bereich elektrische Antriebe. Während in der entsprechenden Einzelstudie nur von einem Einsparpotential von 15 % ausgegangen und eine Umsetzung von 33 — 40 Prozent angenommen wird, ergaben technologische Detailstudien z. B. für Dänemark ein wirtschaftliches Einsparpotential bei Industriebetrieben von 40 Prozent, sofern das Gesamtsystem aus Elektromotor und angetriebenen Prozeß optimiert wird (AKF 1989).

Zweitens handelt es sich bei den errechneten Potentialen für die Grundstoffindustrie z. T nicht um technische, sondern um Erwartungspotentiale bei der moderaten Energiepreisentwicklung des Analyserasters.

Drittens wurde die einzelwirtschaftliche Rentabilität der Maßnahmen mit industrieüblichen Amortisationszeiten ermittelt und nicht mit der in den anderen Studien in der Regel unterstellten technischen Nutzungsdauer.

Viertens wurden daher die Umsetzungsraten der technischen Potentiale bis zum Jahr 2005 nur mit 50 Prozent und weniger angenommen, obwohl mit Sicherheit das hohe Preisniveau in der ‚Energiespar‘-Variante gerade in der Industrie zusätzliche preisinduzierte Einsparpotentiale mobilisieren würde.

#### b) Raumwärmesektor

Die Zahlen zum Alt- und Neubau wurden von den Koordinatoren mehrfach geändert und können kaum noch nachvollzogen werden:

*Altbau:* Der Anteil von 33 Prozent außen nicht dämmbare Fassaden ist von den Koordinatoren offenbar willkürlich angesetzt worden. Das Institut Wohnen und Umwelt (IWU) hatte bereits für Gebäude vor 1918



keine Außenwanddämmung und für einen anderen Teil Innendämmung in seinen Potentialangaben berücksichtigt.

Bei IWU werden alle Einsparungen bis 13 Pf/kWh durchgeführt. Das ‚wirtschaftliche Potential‘ liegt 52 Prozent unter dem Verbrauch des Referenzszenarios. Bis 2005 können 34 Prozent der Nutzenergie d. h. 136 TWh/a mit zusätzlichen einsparbedingten Investitionskosten von 116 Mrd. DM eingespart werden. Im Durchschnitt kostet die eingesparte Kilowattstunde demnach 5,5 Pf/kWh bei einer durchschnittlichen Nutzungsdauer von 25 Jahren. Diese Angaben waren zuvor auch von den Koordinatoren übernommen worden. Die jetzige Anhebung auf 8 Pf/kWh, bei 35 Jahren und nur 85 Mrd. DM Investitionssumme läßt sich nicht nachvollziehen.

**Neubau:** Unklarheiten bestehen vor allem bei den Angaben zum Neubau: Bei der Einsparvariante wurde z. B. ein Nettoheizenergiebedarf von (zunächst 30 bzw. 15 kWh/qm/a) jetzt 40 bzw. 25 kWh/qm/a für Einfamilien- bzw. Mehrfamilienhäuser bei spezifischen Mehrkosten von 200-250 DM/qm Wohnfläche unterstellt.

Das Institut Wohnen und Umwelt (IWU 1990) bemerkt hierzu: „Nach den vorliegenden Erfahrungen lassen sich im Neubau Zielwerte von 40 – 60 kWh/qm/a wirtschaftlich realisieren. Dieser als ‚Niedrigenergiehaus‘ bezeichnete Standard wurde in der Studie für den Neubau (IBP 1989) ‚übersprungen‘. Beim ‚Niedrigenergiehaus Schrecksbach‘, einem Demonstrationsprojekt des Hessischen Ministeriums für Wirtschaft und Technik (HMWT) und des IWU, stehen z. B. Energieeinsparungen von 113 kWh/qm/a bauliche Mehrinvestitionen (gegenüber normaler Bauweise nach Wärmeschutz VO) von 127 DM/qm gegenüber. Bei 4 Prozent Zins und 25 Jahren Nutzungsdauer ist diese Investition bei einem Energiepreis von 7,2 Pf/kWh rentabel (IWU 1990).

Ähnliche bauliche Mehrkosten und spezifische Kosten der eingesparten Energie wurden auch bei anderen Niedrigenergiehäusern erzielt und sind für die Wohngebäude projektiert, die im Rahmen des Förderprogramms des HMWT ‚30 Niedrigenergiehäuser in Hessen, verwirklicht werden.

Nach den langjährigen Erfahrungen in Schweden sind heute in Niedrigenergiebauweise errichtete Gebäude nicht mehr teurer als konventionell gebaute Gebäude (IWU 1990)

Nach Feist/Klien (1989) ist z. B. eine Lüftung ohne Wärmerückgewinnung mit 1 – 2 kWh/qm/a zu realisieren und damit der Schwedische Standard (ohne Wärmerückgewinnung) von etwa 35 – 40 kWh/qm/a deutlich kostengünstiger als mit den im Koordinatorenbericht unterstellten Kosten von 17 Pf/kWh zu erreichen. Bei optimierter Lüftung mit Wärmerückgewinnung werden Werte von 5 – 6 kWh/qm/a erreicht. Die Koordinatoren rechnen aber mit bis zu 12 kWh/qm/a.

## 5.2 Erneuerbare Energiequellen

Eine Klimaschutzpolitik, die dem Kriterium der Risikominimierung entspricht, wird nur dann erfolgreich sein können, wenn der Deckungsanteil der regenera-

tiven Energiequellen innerhalb weniger Jahrzehnte stark angehoben werden kann. Dieser Deckungsanteil hängt entscheidend davon ab, wieviel Energiebedarf durch rationellere Energienutzung vermieden werden und wie gleichzeitig eine entsprechende Entwicklungs- und Marktdynamik zugunsten der erneuerbaren Energiequellen induziert werden kann. Eine Szenarioanalyse von Nitsch/Luther (1990) kommt zu dem Ergebnis, daß bis zum Jahr 2050 der Primärenergiebedarf in der Bundesrepublik von heute rd. 390 Mio. t SKE auf rd. 250 – 270 Mio. t SKE abgesenkt werden kann. Dieser ‚Restenergiebedarf‘ könnte unter Einbeziehung auch großflächiger Solarenergienutzung im In- und Ausland überwiegend (zu  $\frac{3}{4}$ ) aus solaren Energiequellen bei einem Verzicht auf Kernenergie gedeckt werden. Damit wäre auch das von der Enquete-Kommission für 2050 empfohlene Reduktionsziel (80 Prozent CO<sub>2</sub>-Reduktion) realisierbar.

### a. Marktdynamik und strukturelle Hemmnisse zu wenig berücksichtigt

Schwachstellen bei der Berücksichtigung der erneuerbaren Energiequellen im Energiebericht der Koordinatoren liegen darin, daß die

- Entwicklungsdynamik und die aufeinander aufbauenden Stufen bei der Markteinführung,
- strukturellen Voraussetzung einer vorwiegend lokalen (‚dezentralen‘) Solarenergienutzung und
- Hemmnisse bei der Integration in bestehende monopolistische und zentralisierte Angebotsstrukturen

zu wenig berücksichtigt wurden.

Hierdurch kommt es einerseits zur Unterschätzung des technischen und wirtschaftlichen Potentials und andererseits werden die existierenden Hemmnisse gegenüber der ersten entscheidenden Stufe der lokalen Solarenergienutzung – als Vorbedingung einer späteren möglicherweise großflächigen Nutzung – unterschätzt.

### b. Technisches Potential lokaler Solarenergienutzung unterschätzt

Im Energiebericht werden einerseits das technische Potential der regenerativen Energiequellen eher konservativ eingeschätzt und andererseits die Bedingungen für eine erfolgreiche Entwicklungsdynamik nicht hinreichend differenziert. Die für die Enquete-Kommission ‚Technologiefolgen‘ erstellte Studie (Nitsch 1990) kommt zu dem Ergebnis, daß allein für lokale, dezentrale Nutzung (ohne Import solarer Energien und ohne nachwachsende Rohstoffe) ein technisches Potential von 2200 PJ möglich ist. Davon könnten bis zum Jahr 2025 etwa 1700 – 2000 PJ durch Preiserhöhungen (entsprechend der ‚Energiepolitik‘-Variante), die Förderung der Markteinführung und die Änderung zahlreicher struktureller, energiewirtschaftlicher und institutioneller Hemmnisse bereitgestellt werden.

Im Bericht der Koordinatoren wird jedoch das technische Gesamtpotential auf 490 – 560 PJ (Strom) und 920 – 1200 PJ begrenzt. Während die genannte Stu-

die – beim Abbau aller übrigen Hemmnisse – eine Preiserhöhung von 5 DM/GJ bzw. 2 Pf/KWh zur Mobilisierung eines Potentials von 1700 – 2000 PJ für ausreichend hält, wird im Energiebericht bei diesen Preisen nur ein Potential von rd. 530 PJ bzw. bei einer Verdreifachung des Preisaufschlages (15 DM/PJ bzw. 7 Pf/KWh) ein Potential von 914 PJ (allerdings bereits bis 2005) für wirtschaftlich realisierbar gehalten.

Insbesondere die Begrenzung des Wind- und Photovoltaik-(PV)-Erzeugungspotentials auf 100 TWh und dessen Aufteilung auf Wind (30 TWh) und PV (70 TWh) erscheinen willkürlich. Zu Bestimmung des Gesamtpotentials wird „vereinfachend ein Anteil von insgesamt 20 Prozent des Stromverbrauchs als Obergrenze des technischen Potentials für die Stromeinspeisung aus Wind- und PV-Anlagen angenommen“ (S.95). Offensichtlich ist dies eine restriktive Definition eines technischen Potentials, da – durch die Einbeziehung von Speichern, durch Nutzungsoptimierung und durch neuartige Verbundsysteme – technisch höhere Netzanteile auch für fluktuierende Energiequellen möglich sind. In der Literatur werden z. B. bezüglich der installierten Leistung von Windkraftwerken an der gesamten installierten Kraftwerksleistung ohne zusätzliche Speicher Werte zwischen 25 (DIW/ISI, 1987) und 40 Prozent (Jarras) genannt. Dies würde bezüglich der Stromproduktion Werte zwischen 50 und 75 TWh (Nitsch 1990) ergeben. Auch bei dezentral ins Netz integrierter PV erscheint ein technisches Potential von 70 TWh als zu gering angesetzt, Nitsch (1990) geht von 125 TWh aus.

In jeden Fall macht es unter Berücksichtigung der Wirtschaftlichkeit und der Einführungsdynamik wenig Sinn, das Gesamtpotential zwischen Wind und PV im Verhältnis von grob 1 : 2 aufzuteilen. Zwar liegen kostenoptimale PV-Anlagen heute schon bei Stromgestehungskosten von knapp unter 1 DM/kWh (Gutachten der SW München; die Koordinatoren nennen dagegen 1,65 DM/kWh als Untergrenze), aber Strom aus Windkraftanlagen ist derzeit unter günstigen Randbedingungen mindestens um den Faktor 10 (d. h. Gestehungskosten bei 10 Pf/KWh) kostengünstiger.

### c. Volkswirtschaftlicher Nettonutzen vernachlässigt

Im Abschnitt erneuerbare Energiequellen fehlt auch eine systematische Darstellung der ökologischen Vorteile der erneuerbaren Energiequellen. Werden die hierdurch vermiedenen externen Kosten auch nur ansatzweise monetarisiert, können die angegebenen einzelwirtschaftlichen Kosten beträchtlich relativiert werden.

Regenerative Energiequellen sind

- unerschöpflich und garantieren in energieeffizient ‚umgebauten‘ Gesellschaften ein ausreichendes und nachhaltiges (sustainable) Angebot,
- im Vergleich zu fossilen oder nuklearen Energieträgern mit relativ kleinen Risiken behaftet und fügen sich weitgehend in natürliche Kreisläufe ein,
- im hohem Maße sozialverträglich, weil sie insbesondere auch ‚vor Ort‘ im kommunalen Bereich

angewandt werden sowie den Lebensstilen, Konsum- und Produktionsweisen sowohl in Industriegesellschaften (soweit wünschbar) als auch insbesondere in der Dritten Welt angepaßt werden können,

- in ihren Einsatz so flexibel und breitgefächert, daß sie einzelnen Personen, Kommunen oder der Wirtschaft ausreichende Anwendungsfelder bieten,
- in erheblichem Umfang dazu in der Lage, die extrem ungleiche Verteilung der Energieressourcen zwischen den Eigentümer- und Verbraucherstaaten sowie zwischen Nord und Süd abzubauen,
- zukunftsorientiert, da sie zukünftigen Generationen keine irreversiblen Belastungen (z. B. atomare Verseuchung; Atommüll; Klimaverschiebungen) aufbürden.

Der Ersatz fossiler und nuklearer Stromerzeugung durch Elektrizität aus erneuerbaren Energiequellen bringt für die Gesellschaft auf Grund der vermiedenen Schäden einen hohen Nutzen. Eine monetäre Bewertung des Nettonutzens der Stromerzeugung aus Windenergie und Photovoltaik erbrachte für die Bundesrepublik bei konservativen Annahmen und ohne Berücksichtigung der möglichen Schäden aus dem zusätzlichen Treibhauseffekt einen Wert von 8,9 Pf/KWh für Windenergie sowie von 11,9 Pf/KWh für Photovoltaik (Hohmeyer 1988). In dieser Höhe wäre also z. B. eine privilegierte und direkte Förderung der Stromerzeugung aus Windenergie und PV durchaus gesamtwirtschaftlich zu rechtfertigen.

Vor allem aber sind mit der gezielten Förderung der Solarenergie strategische Entscheidungen für die Zukunft der Energieversorgung verbunden. Wer an der Nutzung der Atomenergie festhält, wird diese ökologisch, technologisch und industriepolitisch wichtige Entwicklung blockieren.

### d. Die lokale Solarenergienutzung als entscheidende erste Stufe

Die nachfolgende Tabelle von Nitsch/Luther (1990) zeigt – bezogen auf Endenergie – die mögliche maximale Ausnutzung einer vorwiegend dezentralen Struktur der erneuerbaren Energieerzeugung. Es ist allerdings in Frage zu stellen, ob der bei Nitsch/Luther unterstellte allmähliche Rückzug aus der Kernenergie bis zum Jahr 2020 ausreicht, um die notwendige Entwicklungsdynamik für die lokalen Solarenergiesysteme und deren häufig direkte Koppelung an rationellere Energienutzung auszulösen.

Aus der marktbeherrschenden Stellung monopolistischer Anbieter, aus dem hohen Konzentrationsgrad des Energieangebots und infolge der systemimmanenten Überkapazitäten zentralisierter Stromerzeugung ergeben sich gerade für diese erste entscheidende Stufe der lokalen Solarenergienutzung entscheidende Hemmnisse, die von den Koordinatoren nicht klar genug herausgearbeitet werden. Zum Beispiel wird auf S.90 argumentiert, daß die private Nutzung von Wind- und PV-Anlagen sehr beschränkt sei, „so daß für einen energiewirtschaftlich relevanten Einsatz in erster Linie nur der kraftwerksähnliche Be-

Tabelle 2

**Struktur einer regenerativen Energieerzeugung bei voller Ausnutzung der lokalen Potentiale. Die Zahl der erforderlichen Anlagen zeigt den stark dezentralen Charakter dieser Art von Energiebereitstellung**

Energiequelle	Endenergie TWh/a	Nennleistung GW <sub>th</sub> /GW <sub>el</sub>	Anzahl der Anlagen (10 <sup>3</sup> )	Bandbreite der Leistungen
Solare Wärme .....	111	100	8 745	5–300 kW <sub>th</sub>
Umgebungswärme .....	30	—	3 000	5–100 kW
Biogas .....	20	2,4	140	10–3 000 kW <sub>Gas</sub>
Holz/Stroh .....	64	25	25	500 kW <sub>th</sub> –10 MW <sub>th</sub>
Wind .....	20	14	70	50–1 200 kW <sub>el</sub>
Wasser .....	27	6	10	20 kW <sub>el</sub> –mehrere 10 MW <sub>el</sub>
Photovoltaik .....	56	51	5 000	1–mehrere 100 kW <sub>el</sub>
Summe .....	345 (einschließlich 17 TWh/a aus Müll)			
Beitrag 1987 .....	37,4 = 1,5% des Endenergieverbrauchs 1987			

Quelle: Nitsch/Luther 1990

trieb in Betracht kommt". Gerade die regenerativen Energiequellen sind jedoch dezentrale Technologien, wobei in den meisten Fällen „die direkte Umwandlung von Sonnenenergie in Nutzenergie am Ort des Bedarfs anzustreben (ist)" (Stoy 1986). Wesentlich ist dabei, daß durch diesen dezentralen Einsatz häufig eine direkte Koppelung zwischen Energieeinsparinvestitionen und einer entsprechend angepaßten und damit wirtschaftlicheren Dimensionierung von Erzeugungsanlagen zustande kommt. Denn im Gegensatz zum großtechnischen Energieangebot steigen mit zunehmender Dezentralisierung die Anwendungsfälle, wo die Entscheidungsträger in Bezug auf Einsparung und Erzeugung identisch sind (dies ist im übrigen ein Grund mehr, warum Atomenergie nicht mit forcierter rationaler Energienutzung kompatibel ist (Vergl. auch Punkt 9).

Auf S. 100 des Koordinatorenberichts wird zwar die grundlegende Hemmniswirkung der derzeitigen Versorgungsstruktur in Bezug auf Windparks und große Windkraftanlagen angesprochen. Statt aber eine Änderung dieser Struktur im Rahmen des Hemmnisabbaus vorzuschlagen, wird das realisierbare Potential wegen der restriktiven Bedingungen heruntergestuft: „Bei einer nur unwesentlich geänderten Versorgungsstruktur können solche Anlagen nur von EVU betrieben werden, Einspeisebedingungen spielen unter diesen Voraussetzungen ebenso wie die Durchleitung eine untergeordnete Rolle. Für den erwünschten Einsatz kleinerer WEK stellen sie dagegen starke, unter Umständen sogar maßgebliche Hemmnisse dar. Ähnliches gilt praktisch für alle Technologien zur Nutzung erneuerbarer Energiequellen.“ Die Beispiele USA (Kalifornien) und Dänemark zeigen dagegen, daß selbst unter strukturell restriktiven Rahmenbedingungen engagierte Anreizsysteme (attraktive Einspeisebedingungen und Steuervergünstigungen) zu einem schnellen Wachstum von privat bzw. kommunal betriebenen Windkraftparks führen können.

## 6. Methodik beim Vergleich von Kosten und Wirtschaftlichkeit

Selbst die bisherigen groben Kostenabschätzungen für sämtliche Reduktionsvarianten zeigen, daß ein wirksamer Klimaschutz in der Bundesrepublik finanzierbar ist. Allerdings sind weder im Rahmen einer Gesamtanalyse (z. B. nach dem Maßstäben von ‚Least-Cost Planning‘) noch innerhalb der einzelnen Varianten bisher Kostenoptimierungen möglich gewesen. Da jedoch die unterschiedlichen Kostenabschätzungen leicht als Rangfolge der Wirtschaftlichkeit sowie implizit als Maßstab der Realisierbarkeit der verschiedenen Varianten mißverstanden werden könnten, muß die hierbei verwendete Methodik transparent gemacht werden:

Beim Vergleich der Wirtschaftlichkeit der Investitionen der Varianten wird auf S.220 ff zurecht von Nettokosten ausgegangen: „Diese Nettokosten sind die Differenz zwischen den gesamten Zusatzkosten ... und den eingesparten Energiekosten.“ Dabei werden allerdings bei allen Varianten zur Bewertung der eingesparten Energiekosten die Energiepreise des Analyserasters (Tabelle 3.1.1. auf S.20) zugrundegelegt, obwohl sich gerade die Varianten ‚Energiepolitik‘ (+5 DM/GJ bzw. 2 Pf/kWh) und ‚Energiespar‘ (+15 DM/GJ bzw. 7 Pf/kWh) hiervon durch deutlich höhere Preisannahmen unterscheiden. Auf der Basis dieser Methodik werden dann z. B. folgende typische Schlußfolgerungen über die Rentabilität der Investitionen gezogen: „Die Werte zeigen auch, daß die in Stufe 2 (‚Energiepolitik‘) genannten zusätzlichen Maßnahmen an Rentabilität erheblich einbüßen, weil die Grenzkosten der zusätzlichen Maßnahmen steigen“ (S.220). Nach der Logik dieser Methodik muß vor allem die ‚Energiespar‘-Variante und damit auch die wirtschaftlichen Implikationen des Ausstiegs aus der Atomenergie in einem besonders ungünstigen Licht erscheinen.

Diese Methodik ist jedoch fragwürdig:

- Richtig ist, anhand der unterschiedlichen Investitionssummen (1987 – 2205) aufzuzeigen, daß für die Umsetzung der Varianten voraussichtlich stark unterschiedliche Gesamtinvestitionen aufgebracht und Finanzierungsprobleme gelöst werden müssen. Für die Wirtschaftlichkeit und damit letztlich auch für die Umsetzbarkeit der Strategien ist jedoch der Vergleich der Nettokosten maßgebend.

Ein Nettokosten-Vergleich zwischen den Varianten muß auf der Grundlage der jeweiligen Preis- und Mengengerüste der einzelnen Szenarien erfolgen, sonst ist er inkonsistent: Man kann nicht einerseits bei ‚Energiepolitik‘ bzw. ‚Energiespar‘ ein durch höhere Energiepreise induziertes größeres Potential für Effizienz, KWK und Regenerative voraussetzen und dann die ökonomische Triebkraft hierfür – die höheren ‚anlegbaren‘ Brennstoff- bzw. Strompreise – bei der Bewertung der wirtschaftlichen Implikationen wieder herauskürzen.

- Am deutlichsten wird dies am Beispiel von Wärmedämminvestitionen: Einerseits verlangt der Übergang von ‚moderat‘, zu ‚Energiepolitik‘ bzw. ‚Energiespar‘, daß Investoren bereit sind, trotz steigender Grenzkosten in teure Maßnahmen zu investieren. Sie tun dies aber andererseits in der Realität nur, wenn sie – auf Grund der ansteigenden anlegbaren Heizölpreise – durch entsprechend höhere vermiedene Energiekosten für die steigenden Investitionsaufwendungen kompensiert werden. Daher ist es falsch, in der ‚Energiesparvariante‘ die Vornahme besonderes teurer Wärmedämmmaßnahmen vorauszusetzen und bei der Berechnung der Nettokosten die vermiedenen Energiekosten zu den geringen Preisen aus dem Analyseraster zu bewerten.

Demnach wirkt sich diese fragwürdige Methode der Nettokostenrechnung bei der dem Ausstieg aus der Atomenergie zugrundeliegenden Energiesparvariante besonders drastisch aus, weil hier einerseits extrem hohe Preisaufschläge (15 DM/GJ; 7 Pf/kWh) und damit auch kostenintensive Investitionsmaßnahmen unterstellt werden, denen jedoch kein entsprechender Nutzen durch eine höhere Einsparungen von Energiekosten gegenüberstehen.

## 7. Implikationen und Widersprüche der Reduktionsvariante ‚Energiepolitik‘ bei fortbestehender Kernenergienutzung

Im Rahmen einer nur auf das 30-Prozent-Minderungsziel bei Kohlendioxid beschränkten Energiepolitik – unter Ausklammerung der atomaren Risiken – scheint auf den ersten Blick alles dafür zu sprechen, die Atomenergie, wenn schon nicht auszubauen, so doch zumindest in der derzeitigen Kapazität zu belassen. Mit der damit verbundenen Besitzstandswahrung für die Atomenergie könnten, so wird argumentiert, nicht nur scheinbar unnötige Konflikte mit den Betreibern und Befürwortern der Atomenergie, sondern auch sonst anfallende CO<sub>2</sub>-Emissionen vermieden werden. Die von vorneherein unterstellten scheinbar

größeren Realisierungschancen einer CO<sub>2</sub>-Reduktionspolitik bei fortgesetzter Nutzung der Atomenergiekapazität gegenüber einem Ausstieg aus der Atomenergie scheinen daher keiner besonderen Begründung zu bedürfen.

Wenn Atomstrom ohne Kohlendioxid-Emissionen bereitgestellt werden kann und die durch einen Ausstieg ausfallende atomare Stromerzeugung sogar im gleichen Umfang durch Strom aus fossil gefeuerten Kraftwerken ersetzt werden müßte, könnte eine CO<sub>2</sub>-Minderungspolitik nur schwer mit einer Ausstiegspolitik verbunden werden. Im Gegenteil: Könnte die Atomenergie im gleichen Umfang mit den Potentialen erneuerbarer Energiequellen und rationellerer Energienutzung kombiniert werden wie bei einer Ausstiegstrategie, müßte im Rahmen einer Ausbaustrategie die CO<sub>2</sub>-Minderung noch umfangreicher ausfallen. Auf dieser oberflächlichen Plausibilität der ‚CO<sub>2</sub>-freien Atomenergie‘ basieren auch die Varianten des Energieberichts, in denen eine konstante, vor allem sogar eine wachsende Atomenergiekapazität technisch scheinbar problemlos mit den Potentialen der ‚Energiepolitik‘-Variante, bzw. der Hemmnisabbau-Variante – also mit mehr Energiesparen und mehr erneuerbaren Energiequellen – kombiniert werden.

Diese scheinbaren Vorteile der Atomenergie für eine CO<sub>2</sub>-Minderungspolitik sind allerdings bei näherer Analyse fraglich:

- Im folgenden sollen zunächst die Implikationen und Widersprüche aufgezeigt werden, die sich im Rahmen des Reduktionsszenarios bei fortgesetzter Nutzung der Atomenergiekapazität ergeben. Von Bedeutung sind vor allem folgende Aspekte:
  - die Ausdehnung der Atomstromerzeugung um 30 TWh (von 130 TWh auf 160 TWh), indem die heutige Kernenergiekapazität mit durchschnittlich 7200 Vollaststunden betrieben wird. Dies ist bis zum Jahr 2005 nur möglich, wenn auch neue Anlagen als Ersatz für alte Kernkraftwerke von der Bevölkerung akzeptiert würden;
  - die vorzeitige Stilllegung von Kondensationskraftwerken auf Steinkohle- bzw. Braunkohlebasis, in denen der Steinkohleeinsatz um 73 Prozent bzw. der Braunkohleeinsatz um 31 Prozent bis zum Jahr 2005 sinkt. Hierzu im Widerspruch steht die Annahme, daß gleichzeitig mit dieser Stilllegung der Wirkungsgrad von Kohle-Kondensationskraftwerken bis 2005 um 4 Prozent verbessert wird, was jedoch einen Neubau von Kraftwerken erfordert,
  - der sinkende Bedarf an Braunkohle um 39,3 Prozent und an Steinkohle um 38,5 Prozent (d. h. auf knapp 40 Mio. t). Damit liegt der Steinkohlebedarf 15 Mio. t unter der von der Mehrheit der Mikat-Kommission für 2005 vorgeschlagenen ‚Effizienzgrenze‘ und dazu gehörenden Förderhöhe von 55 Mio. t,
  - der Ausbau von Heizkraftwerken in der Industrie und im Kleinverbrauch um 70 Prozent und bei den Kommunen um 100 Prozent (insgesamt rd. 54 TWh zusätzlich); die Stromerzeugung aus Wasserkraft steigt um 4 TWh, aus Windkraft um

4,8 TWh und aus PV um 0,5 TWh. Insgesamt müssen daher auf dem schon bislang von erheblichen Überkapazitäten (mindestens 10 GW) geprägten Strommarkt ein zusätzliches Angebot von 30 TWh Atomstrom, rd. 54 TWh aus neuen Heizkraftwerken und rd. 9 TWh aus neuen Anlagen auf der Basis erneuerbarer Energiequellen rentabel untergebracht werden. Da gleichzeitig die Stromnachfrage fast konstant bleibt, die Bruttostromerzeugung von 1987 bis 2005 wächst nur um rd. 3 TWh, erscheint es unwahrscheinlich, daß sich die notwendigen Investoren für das zusätzliche – vor allem dezentrale – Stromangebot von rd. 64 TWh finden lassen: Umfang und Struktur des Stromangebots wirken als Investitions- und Innovationsblockade. Durch die Atomstromerzeugung findet darüberhinaus ein massiver Verdrängungswettbewerb gegenüber die Kohleverstromung statt.

Da somit der im Strombereich unterstellte Substitutionsbeitrag der erneuerbaren Energiequellen von 83,5 PJ und von 195 PJ durch – vor allem gasgefeuerte – KWK nicht gesichert ist, kann das CO<sub>2</sub>-Minderungsziel in dieser Variante nicht in voller Höhe erreicht werden.

Die massive Kohleverdrängung sowie die Marktzutrittsblockade für Newcomer (Heizkraftwerke, Regenerative) potenziert sich, wenn – wie in der Ausbau-Variante – die

Atomkapazität auf LWR-Basis auf 36,6 GW angehoben wird, gleichzeitig aber die Annahmen der Untervariante ‚Hemmnisabbau‘ weitgehend übernommen werden:

- der Bedarf an Steinkohle sinkt um 41,5 Prozent und an Braunkohle um 54,7 Prozent. Die vorzeitige Stilllegung von fossil kohlegefeuerten Kondensationskraftwerken wird weiter forciert,
  - die hier ebenfalls unterstellte Ausdehnung der Stromerzeugung aus neuen Heizkraftwerken (rd. 54 TWh) sowie aus erneuerbaren Energiequellen (etwa 5 TWh) läßt sich bei der gleichzeitigen extremen Atomstromsteigerung auf dem Markt nicht unterbringen.
- b) In allen Szenarien wurde zudem unterstellt, daß die Atomstromerzeugung ‚CO<sub>2</sub>-frei‘ ist. Dies gilt zwar für die Stromerzeugung im Atomkraftwerk, nicht jedoch unter Einrechnung der Emissionen aus der vorgelagerten Prozeßkette sowie aus der Materialherstellung für das Kraftwerk. Ein systematischer Vergleich der Gesamtemissionen von Stromerzeugungssystemen ist von Fritsche et al im Rahmen eines vom Hessischen Minister für Wirtschaft und Technik geförderten Projekts (GEMIS 1990) vorgenommen worden. Bezogen auf jeweils eine Kilowattstunde bereitgestellte Elektrizität ergeben sich aus der Aufsummierung der Emissionen aus den vorgelagerten Prozeßketten und durch die Materialherstellung für die Energiewandler die folgenden Emissionen (in g/kWh el):

Tabelle 3

**Gesamtemissionen von Stromsystemen (g/kWh<sub>el</sub> frei Netz)**

System	SO <sub>3</sub>	NO <sub>x</sub>	CO <sub>2</sub>
Atomkraftwerk .....	0,03	0,13	54
Steinkohle-Kraftwerk .....	0,73	0,71	929
Kohle-Heizkraftwerk *) .....	0,17	0,28	438
Gas-GuD-Kraftwerk .....	0,02	0,70	433
Gas-GuD-Heizkraftwerk *) .....	-0,64	0,18	- 188
Gasturbinen-Heizkraftwerk *) .....	-0,63	0,54	33
Gasmotor-Blockheizkraftwerk *) .....	-0,75	0,30	- 21
Solarzelle .....	0,03	0,03	30
Windkraft klein .....	0,01	0,01	11
Wasserkraft klein .....	0,01	0,01	2
Biogas-Blockheizkraftwerk *) .....	-0,79	0,85	-1 121

\*) = strombezogene Nettoemission (Wärmegutschrift über Öl-Heizung)  
 Quelle: Fritsche 1990

Beim Emissionsvergleich der Atomenergie mit KWK-Systemen muß berücksichtigt werden, daß die in der Bundesrepublik betriebenen großen Leichtwasserreaktoren nur zur Stromerzeugung eingesetzt werden und eine nachträgliche Auskoppelung von Fernwärme – allein schon wegen der fernliegenden Wärmeabsatzgebiete – nach heutigem Stand höchstens nur in unbedeutenden Fällen möglich wäre. Bei KWK-Systemen können auf der anderen Seite, da sie von vornherein zur Substitution konventioneller Hei-

zungssysteme konzipiert sind, die durch die Auskoppelung von Nah- und Fernwärme vermiedenen Emissionen von den Gesamtemissionen abgezogen werden (sog. Wärmegutschrift). Üblicherweise werden dabei die Emissionen von mit leichten Heizöl betriebene Zentralheizungen oder ein Mix aus Gas- und Heizöl-Feuerung zugrundegelegt.

Die Tabelle zeigt, Strom aus Atomkraftwerken verursacht zwar weniger CO<sub>2</sub>-Emissionen als Kohlekraft-,

Heizkraftwerke sowie gasbetriebene GuD-Kraftwerke, aber mehr als gasbetriebene Heizkraftwerke und erneuerbare Energiequellen. Am günstigsten sind die Ergebnisse, wenn Strom aus regenerativen Energiequellen in KWK erzeugt wird (Biogas-Blockheizkraftwerke). Dabei ist der heutige Stand der Technik und von Wirtschaftlichkeit zu beachten.

Die energetisch aufwendigste Stufe in der atomaren Prozeßkette ist die Urananreicherung. Entscheidend für die Berechnung der CO<sub>2</sub>-Emissionen ist, mit welchem Anreicherungsverfahren (Gasdiffusion oder Gas-Zentrifuge) und mit welchem Kraftwerksmix der hierfür benötigte Strom hergestellt wird. In der obigen Tabelle ist mit dem bundesdeutschen Grundlast-Kraftwerksmix gerechnet worden, da abgesicherte Daten über die Herkunftsländer von angereichertem Uran nicht vorlagen.

Die Angaben über dem Atomstrom zurechenbare CO<sub>2</sub>-Emissionen schwanken von 5 g/ kWh (VDEW 1990) bis 76 g/kWh (deVries 1989). Selbst im für Atomstrom günstigsten Fall ergibt sich: Gas-GuD-Heizkraftwerke verursachen ‚netto‘ weniger CO<sub>2</sub> pro Kilowattstunde als Atomkraftwerke, selbst wenn nur Gasheizungen ersetzt würden und die VDEW-Daten für Atomstrom als Vergleich dienen (Fritsche et al. 1990).

## 8. Ausstiegs-Variante nicht gründlich analysiert

Der Bericht der Energie-Koordinatoren kommt zu dem Ergebnis, daß es bei einer entsprechend veränderten Politik möglich ist, daß „Ziel der CO<sub>2</sub>-Emissionsreduktion in dem vorgegebenen Umfang (rd. 30 Prozent) mit demjenigen eines bis zum Jahr 2005 zu vollziehenden Ausstiegs aus der Kernenergie zu verbinden“ (S. 257). Allerdings wird „vermutet“, daß „...die gleichzeitige Verfolgung beider Ziele teilweise zu einer zusätzlichen wirtschaftlichen Belastung führen würde“.

Obwohl für den ‚Exkurs: Ausstiegsvariante 1995‘ nur „qualitative Hinweise“ gegeben werden konnten, überwiegen hier insbesondere die skeptischen Einschätzungen: Selbst die technische Machbarkeit wird – allerdings auf der Grundlage einer groben und Kapazitätsabschätzung – in Zweifel gezogen.

Diese Einschätzungen beruhen nicht auf einer optimierten Szenarienanalyse, die unter dem Zeitdruck von den Koordinatoren nicht mehr erstellt werden konnte.

Das ÖKO-Institut hat mit einer neuen Szenariorechnung (ÖKO-Institut 1990) gezeigt, daß ein kurzfristiger Ausstieg mit einer weitgehenden CO<sub>2</sub>-Minderung verbunden werden kann. Eine Variante ‚Ausstieg bis zum Jahr 1995‘ ist auch im Auftrag der Enquete-Kommission gerechnet worden und im Bericht aufgenommen.

Hier wird im folgenden auf einige ausgewählte Annahmen und Schlußfolgerungen im Energiebericht der Koordinatoren eingegangen:

- Im Ausstiegszenario sinkt die Stromerzeugung innerhalb von 18 Jahren (1987 – 2005) nur um 38,4 TWh (d. h. um 9%). Es erscheint durchaus wahr-

scheinlich, daß mit forcierten Stromsparprogrammen, wie sie derzeit in Dänemark (AKF 1989) und in Schweden konzipiert werden (vergl. Johansson et al 1989) eine stärkere Stromeinsparung erreicht werden kann. Schweden geht z. B. davon aus, daß beim Stand der Technik gegenüber dem Referenzwert von 140 TWh bis zum Jahr 2010 eine Senkung des Stromverbrauchs auf 96 TWh möglich sei. Für Dänemark wurde unter Berücksichtigung der Technikentwicklung bis 2000 ein Stromsarpotential von fast 50% (bezogen auf heutige Werte) ermittelt (AKF 1989).

- Die Kraft-Wärme-Koppelung wird, obwohl eine der kostengünstigsten Optionen, nur um rd.72 TWh (brutto) ausgebaut. Dies sind nur 17,6 TWh mehr als bereits in der Variante mit konstanter bzw. mit steigender AKW-Kapazität angenommen wurde. Dieser kaum unterschiedliche Ausbau in den drei Varianten ist nicht wahrscheinlich, weil vor allem mit dem Ausstieg und den damit erst bereinigten Überkapazitäten eines der zentralen Investitionshemmnisse für den verstärkten Zubau von KWK-Anlagen wegfallen würde.

Bei der Kraft-Wärme-Koppelung wurde zudem erheblich vom technischen Potential abgewichen, das sich laut Einzelstudie bis 2005 realisieren läßt, „wenn alle technisch machbaren und betriebswirtschaftlich rentablen Maßnahmen zum Schutz der Erdatmosphäre verwirklicht werden“ (Kaier/Suttor 1989). Da diese Rahmenbedingungen vor allem für die Ausstiegsvariante zutreffen, hätte dort von einem zusätzlichen Stromerzeugungspotential in KWK von etwa 85 TWh (netto) bei fossilen Brennstoffen sowie von 17 TWh (netto) zusätzlich aus regenerativen Energieträgern ausgegangen werden können: „Grund ist die Tatsache, daß zuwachsende KWK-Potentiale überwiegend im elektrischen Leistungsbereich weit unter 100 MW el stattfinden werden, sehr dominierend mit erdgas-gefeuerten Gasturbinen, Kombiprozessen und Motoren“ (Kaier 1990).

- Die für die Ausstiegsvariante ermittelten Maßnahmenbündel und Investitionskosten basieren vor allem auf dem vorgegebenen Mengengerüst der ‚Energiespar‘-Variante, das wegen des Zeitdrucks noch nicht optimiert werden konnte. Eine solche Optimierung würde zu einer deutlichen Kostensenkung führen und einige der derzeitigen Ungeheimheiten in den Annahmen bereinigen. So ist z. B. nicht zu erklären, weshalb die Steigerung der KWK-Erzeugung um nur 14 TWh die Investitionskosten gegenüber der ‚Energiepolitik‘-Variante um fast 15 Mrd. DM erhöht und die Nettoeinsparung von bisher minus 420 Mio. DM/a in Nettokosten von plus 720 Mio. DM/a umdreht. Ebenso wenig plausibel ist, daß die besonders kostenintensiven Wärmepumpen und Solarkollektoren (Investitionssumme 135 Mrd. DM) in großem Umfang ausgedehnt werden müssen, während z. B. die kostengünstigeren Möglichkeiten der effizienten Warmwasserbereitung, die Substitution aller Stromheizungen sowie der Ausbau von solaren und anderen Nahwärmesystemen noch nicht ausgeschöpft sind.

Daß im Neubau wesentlich kostengünstigere Baukonzeptionen von Niedrigenergiehäusern nur unzureichend berücksichtigt worden sind, ist bereits ausgeführt. Im besonders kostenintensiven Raumwärmebereich (Investitionssumme 217 Mrd. DM) wären demnach ebenfalls noch Kostensenkungen möglich.

- Während im Ausstiegsszenario die Umstrukturierung des Kraftwerksparks und mögliche volkswirtschaftliche Implikationen — als scheinbare Argumente gegen einen Ausstieg — angeführt werden, geschieht dies in den anderen Szenarien nicht. Hierzu muß festgestellt werden: Alle Szenarien sind mit erheblichen sozialen und regionalen Auswirkungen verbunden, z. T. sind die betroffenen Wirtschaftszweige von erheblichen Absatzeinbußen und den daraus resultierenden wirtschaftlichen und sozialen Implikationen betroffen. Dies ist nicht spezifisch auf die Frage des Ausstiegs aus der Kernenergie zurückzuführen, im Gegenteil: Die negativen Konsequenzen würden gerade bei einer Ausstiegsstrategie weniger stark ins Gewicht fallen als bei einer weiteren Nutzung der Atomenergie auf heutigem Niveau oder erst Recht bei einem Ausbau. Dies gilt besonders für den heimischen Bergbau. Im übrigen müssen die genannten negativen Implikationen (auch hinsichtlich der Atomindustrie) volkswirtschaftlich bei einer Ausstiegsstrategie mit positiven Effekten saldiert werden: Durch die Erschließung der CO<sub>2</sub>-Minderungspotentiale durch Investition in mehr KWK, mehr Regenerative und mehr Effizienz ergeben sich — wie bereits in einer Prognos-Studie (1987) ermittelt worden war — sehr wahrscheinlich netto deutlich positive Arbeitsplatz- und Wachstumseffekte.
- In der Ausstiegsvariante bis 1995 wird davon ausgegangen, daß die CO<sub>2</sub>-Emissionen „nur wenig mehr als 3 Mio. t bzw. unter 1 Prozent“ ansteigen werden. Auch wenn dies für viele besorgte Menschen in der Bundesrepublik bereits ein akzeptabler „Preis“ für den Verzicht auf die Atomenergie und deren Risiken in der Bundesrepublik darstellen würde, kann dieses Ergebnis so nicht hingenommen werden: Zum einen kommt es nicht auf die CO<sub>2</sub>-Emissionen zu einem bestimmten Stichjahr an, sondern ob in der Summe durch eine entschiedene Weichenstellung und durch den Umbau des Energiesystems ohne Atomenergie weniger CO<sub>2</sub> freigesetzt wird als mit Kernenergie. Zum anderen ist wahrscheinlich, daß die im Koordinatenbericht auf S.113 unterstellten Sofortmaßnahmen zur CO<sub>2</sub>-Minderung — 50 Mio. t CO<sub>2</sub>-Minderung vor allem durch vorübergehend verstärkte Auslastung bestehender gas- und ölbefuehrter Kraftwerke — bei den Ausstiegs-Varianten nicht konsequent ausgenutzt wurden.

## 9. Atomenergie contra Klimaschutz?

Die Widersprüche und Folgewirkungen zeigen, daß — selbst bei Ausklammerung der atomaren Risiken — die systemaren Zusammenhänge der Atomenergienutzung für eine Klimaschutzpolitik weit komplizierter sind, als auf den ersten Blick angenommen werden

könnten. Der Frage, ob die Atomenergie eine Klimaschutzpolitik eher fördert oder behindert, muß daher genauer nachgegangen werden.

Bislang liegt keine umfassende Analyse dieser Grundsatzfrage vor. Mit der üblichen Szenarioanalyse kann sie ohnehin nicht abschließend geklärt werden, wenn nicht gleichzeitig die realen Hemmnisse, Entwicklungsdynamik und Funktionslogik des bestehenden Energiesystems auf mikro- und makroökonomischer Ebene mit in die Untersuchung einbezogen werden. Wo dies ansatzweise geschehen ist (z. B. IIASA 1982; Scheffold 1987; Krause et al 1989; Hennicke 1989 und 1990), wird eine Vereinbarkeit von Atomenergie und forcierter rationeller Energienutzung ausgeschlossen.

### 9.1 ‚Extremes Sparen‘ oder ‚Trendsparen‘?

Eine weltweite Strategie der Risikominimierung ist nur möglich, wenn schnellstmöglich eine Politik der forcierten rationellen Energienutzung durchgesetzt wird. Das setzt den grundlegenden Umbau der Struktur der heutigen Energieversorgung voraus.

Die heutige Politik wird durch ‚angebotsorientierte‘ Szenarien legitimiert, die Energieprobleme aus der Verkäuferspektive — durch Ausweitung und Diversifizierung des Energieangebots — angehen. Beispielhaft hierfür sind die IIASA-Szenarien von Häfele et al: Der Primärenergiebedarf wächst selbst nach dem seinerzeit als äußerst moderat eingeschätzten IIASA-Szenario (low) bis zum Jahr 2030 auf 22,4 TW. Die Atomenergie steigt auf 5,17 TW (um das 10fache gegenüber 1987) und die Regenerativen auf 2,28 TW. 67 Prozent des Primärenergiebedarfs (7 TW) müßten dann immer noch fossil gedeckt werden — mit der Folge, daß die Kohlenstoff-Emissionen gegenüber 1985 auf fast das Doppelte (9,4 Mrd. t) anwachsen würden. Hieraus wird deutlich, daß die IIASA-Szenarien (insbesondere das high-Szenario mit 35,6 TW, davon 8,1 TW Atomenergie in 2030) einen risikokumulierenden Effekt haben: Trotz eines exorbitanten Zuwachses der Atomenergie steigen in beiden Szenarien die Kohlenstoff-Emissionen dramatisch an (gegenüber 1985 auf das dreifache d. h. 15,8 Mrd. t Kohlenstoff im high Szenario). Im Extremfall drohen dann Klimakatastrophe und atomarer GAU gleichzeitig.

Die negative Bewertung kann generalisiert werden: In allen traditionellen angebotsorientierten Szenarien ergibt sich eine derartige Risikokumulierung. Dies gilt auch für die Szenarien der Weltenergiekonferenz in Montreal: Auch hier wird bis zum Jahr 2020 trotz einer Steigerung der Atomenergiekapazität um mehr als das zwei- bis dreifache mit einer Zunahme der CO<sub>2</sub>-Emissionen um 40 -70 Prozent gerechnet.

1985 lag der Welt-Primärenergieverbrauch bei etwa 10,5 TW. Die Bandbreite der Schätzungen für das Jahr 2030 liegt etwa zwischen 35 TW (IIASA high) und 5 TW (Effizienzzenario von Lovins u. a. ohne Atomenergie). Technisch machbar sind beide Energiezukünfte, obwohl sie sich um den Faktor 7 unterscheiden. Diese Zahlen belegen die Anfangs dargelegte gesellschaftliche Gestaltbarkeit von Wirtschaft und Technik.

Die Schlußfolgerung ist eindeutig: Die Zunahme und die Verteilung des Weltenergieverbrauchs (auf Industrie- und Entwicklungsländer), nicht die Diversifizierung des Energieangebots sind die zentralen Probleme einer klimaverträglichen Weltenergiestrategie. Innerhalb des großtechnischen angebotsorientierten Energiesystems mit Atomenergie bestand bislang in der Bundesrepublik nicht die Wahl zwischen mehr oder weniger Risiko, sondern eine systemimmanente Tendenz zur Risikokumulierung. Wie ein Rückblick auf die repräsentativen Szenarien der Enquete-Kommission ‚Zukünftige Kernenergie-Politik‘ (1980) zeigt, war dies der bislang nahezu selbstverständlich akzeptierte Stand in Wissenschaft, Politik und Wirtschaft. Auch in der Bundesrepublik haben die Vertreter des angebotsorientierten Paradigmas bis in die jüngste Zeit die Energieprognosen und -programme nahezu unangefochten dominiert.

Gegenüber der Öffentlichkeit präsentieren sich Betreiber und Befürworter der Atomenergie gern als nüchterne Realisten und ihre Kritiker als die Utopisten. Eine seltsame Verkehrung der Realität: Auf keinem Feld der Energiepolitik verstieg sich die überwiegende Mehrheit von Atom-Befürwortern zu derartigen Fehleinschätzungen wie in der Frage der Realisierungschancen für die Atomenergie bzw. für die Energieeinsparung. Da die realistische Einschätzung insbesondere des Energiesparens eine Schlüsselfrage für eine Klimaschutzpolitik ist, kann hier ein Rückblick auf die bisherige Entwicklung wichtige Anhaltspunkte liefern:

Erstmalig hat 1980 die damalige Enquete-Kommission ‚Zukünftige Kernenergie-Politik‘ systematisch „vier repräsentative energie-politische Energiepfade“ für einen Zeitraum von 50 Jahren konzipiert. Im Pfad 1 wurde bis 2030 ein Atomenergieausbau von mindestens 165 GW (davon 50 Prozent Brüter) für möglich und wünschbar gehalten, dennoch wären die CO<sub>2</sub>-Emissionen noch erheblich angestiegen, weil im Pfad 1 mindestens eine Verdoppelung des Primärenergieverbrauchs (auf 800 Mio. t SKE in 2030) für akzeptabel und hinsichtlich Wirtschaftswachstum und Erlangung der sozialen Sicherung für vorteilhaft gehalten wurde. Auch im Pfad 2 wurde noch von einem Primärenergiezuwachs auf mindestens 550 Mio. t SKE (2030) und von einer Atomenergiekapazität von mindestens 120 GW (davon 54 GW Brüter) ausgegangen.

Im Pfad 4 war dagegen ein Ausstieg aus der Atomenergie und eine Absenkung des Primärenergieverbrauchs auf 310 Mio. t SKE (2030) errechnet worden. 1980 wurde diese Energieeinsparung mehrheitlich als „extrem“ eingestuft, die technische Machbarkeit war „äußerst umstritten“ und die Kosten galten als „nicht abschätzbar“. Prof. Häfele glaubte den Befürwortern von Pfad 3 und 4 und den Kritikern eines ‚Atomstaats‘ entgegenhalten zu können: „Dann wären ebenso Kontroll- und Durchsetzungsmaßnahmen zum sehr starken und extremen Sparen, als Weg zum ‚Kalorienstaat‘ apostrophierbar, in dem die letzte Kalorie staatlich bewacht wurde“ Und weiter: „Es ist nun entscheidend zu erkennen, daß jedwedes Sparen nicht erprobt ist ... Demgegenüber muß der Brüter als bereits hochgradig erprobt gelten“.

Dieser Fehleinschätzung schlossen sich die 3 Vertreter der Union in der Kommission im Tenor an. Auch sie konstatierten: „Pfad 1 dürfte der Realität wesentlich näher sein als die Gruppe der übrigen Pfade.“

Heute wissen wir: Im Gegensatz zu einer in der Öffentlichkeit verbreiteten Legende lagen die Befürworter der Pfade 1 und 2 weit abseits der Realität. Allein das Trendsparen in der Bundesrepublik hat schon dazu geführt, daß zumindest in den nächsten zwei Jahrzehnten der Primärenergieverbrauch aller Wahrscheinlichkeit nach nicht über 400 Mio. t SKE ansteigen wird (Esso 1989). Bei Ausschöpfung des vorhandenen wirtschaftlichen und insbesondere des technischen Energieeinsparpotentials kann der Zielwert des Pfad 4 (310 Mio. t SKE bis zum Jahr 2030) weit unterschritten werden. Die Szenario-Rechnung von Nitsch/Luther (1990) errechnet für das Jahr 2020 ein Zielwert von 313 Mio. t SKE als Trendvariante und hält eine Absenkung auf 252 Mio. t SKE für möglich. Heute besteht vermutlich sogar breite Übereinstimmung, daß der Einspar-Pfad 4 weit gangbarer ist als das extreme Wachstum der Energienachfrage mit dem gewaltigen Ausbau der Atomkraft in Pfad 1.

Natürlich sind die Fehleinschätzungen der Vergangenheit kein hinreichender Beleg dafür, daß Atomenergie und Energiesparen in Zukunft nicht doch vereinbar sein könnten. Warum also nicht einen „neuen energiepolitischen Konsens“ nach der Devise ‚Atomenergie und Sparen‘ formulieren?

## 9.2 ‚Effizienzrevolution‘ bedeutet mehr als ‚Trendsparen‘

Noch vor wenigen Jahren wurde die technische Machbarkeit forcierter Energiesparmaßnahmen schlicht bestritten und/oder zumindest im Gegensatz zur großtechnischen Ausweitung des Energieangebots gesehen (IISSA 1982). Unter dem Eindruck der Umwelt- und Klimadiskussion hat sich dies scheinbar geändert. Heute ist jeder für Energiesparen. Aber das Bekenntnis zum Energiesparen tritt noch zu häufig an die Stelle der wissenschaftlichen Analyse der umfangreichen technischen Einsparpotentiale und fast immer fehlt der entschlossene energiepolitische Wille und das instrumentelle Konzept zur umfassenden Implementierung von „NEGAWatt“ (Amory Lovins). „Vom technologischen Standpunkt aus sind theoretische Potentiale rationellerer Energienutzung von über 80 Prozent, bezogen auf den heutigen Primärenergieverbrauch in der Bundesrepublik, denkbar“ (Koordinatorbericht, S.55); z. B. bei Alt- und Neubauten sind Einsparpotentiale von 70 – 90 Prozent Stand der Technik (S.26).

Damit ist erstmalig offiziell bestätigt worden, daß auch in der Bundesrepublik eine ‚Effizienzrevolution‘ (A.Lovins) technisch möglich ist. Ob, wie und wann diese umfangreichen technischen Einsparpotentiale auch realisiert werden können, sind die Kernfragen der zukünftigen Klimastabilisierungspolitik. Daß die ‚Effizienz-revolution‘ theoretisch eine risikominimierende Strategie ist, wird auch von Skeptikern heute akzeptiert. Diejenigen, die trotz Tschernobyl an der



atomaren Option festhalten oder sie sogar ausweiten wollen, bestreiten vor allem, daß Energiesparen im geforderten Umfang praktisch möglich ist.

Natürlich findet bei zukünftig wieder steigenden Energiepreisen trotz aller Hemmnisse stets ein gewisses „Trendsparen“ statt. Aber ‚Trendsparen‘ im Rahmen einer sonst unveränderten angebotsorientierten Energie- und Unternehmenspolitik erschließt nur einen Bruchteil der vorhandenen „gehemmten wirtschaftlichen Potentiale“ (E. Jochem). Würden andererseits diese Potentiale durch eine aktive Energie- und Unternehmenspolitik systematisch umgesetzt, wird die Atomenergie zur Energiebedarfsdeckung unnötig – denn der geringe atomare Endenergieanteil (heute in der Bundesrepublik etwa 7%) kann dann ‚weggespart‘ werden. Die These von der Vereinbarkeit von Energiesparen und Atomenergie ist widersprüchlich. Entweder ist nur ‚Trendsparen‘ gemeint, dann muß – unnötig riskant und teuer – weiter an der Atomenergie festgehalten werden. Oder es geht tatsächlich um Priorität für rationelle Energienutzung und den planmäßigen Einsatz von ‚Einsparkkraftwerken‘ (Lovins), dann wird die Atomenergie nicht nur unnötig, sondern zum Hemmschuh für deren Markteinführung.

Diese Widersprüche zwischen fociertem Energieeinsparung und Atomenergie werden von H. L. Schmid, Vizedirektor des eidgenössischen Amtes für Energiewirtschaft, (die Schweiz hat einen Atomstromanteil von 38 Prozent) wie folgt formuliert: „If energy efficiencies were strengthened still more...emissions of pollutants and CO<sub>2</sub> could be reduced even further, and a partial nuclear phase-out would result...The scenarios suggest that, in the case of Switzerland, which has practically no fossil fired electricity generation, the major contribution to reduce CO<sub>2</sub>-emissions has to be provided by increased energy efficiency...The efficiency strategy is preferable under safety and environmental aspects. At least in the Swiss context, it is moreover less expensive and may be less difficult to realize“ (Schmitt 1989)

Ein ähnliches Fazit für die Schweiz zieht eine Studie des Ingenieurbüros Elektrowatt: „Fazit: Für die zukünftige Emissionsentwicklung in der Schweiz ist die Ausgestaltung der Sparpolitik weit wichtiger als jene der Kernenergiepolitik. Sofern der Ausbau der Kernenergie nicht mit einer konsequenten Sparpolitik begleitet wird, erhöhen sich die CO<sub>2</sub>-Emissionen trotz der beabsichtigten Erdölsubstitution. Eine Konsolidierung oder Verminderung des CO<sub>2</sub>-Ausstosses kann nur mit Hilfe eines umfassenden Sparprogramms erreicht werden. Wenn ein solches verwirklicht werden kann, erübrigt sich angesichts der Energieverbrauchsentwicklung der verstärkte Ausbau oder allenfalls auch der Weiterbetrieb von Kernkraftwerken.“ (Elektrowatt 1989)

Während Herstellung, Planung, Bau und Betrieb von Anlagen des Energieangebots auf dem Erfahrungsschatz und der Infrastruktur eines Jahrhunderts leitungsgebundener Energiewirtschaft aufbauen kann und von ökonomisch höchst potenten und zentralisierten Anbieterinteressen vorangetrieben werden, stehen ‚Einsparkkraftwerken‘, die in der Regel die Entscheidungen einer Vielzahl von Nutzern erfordern, sowohl hinsichtlich der notwendigen Technologien

als auch der Methodik erst am Anfang. Für das Umsteuern in eine energie-effiziente Gesellschaft („Effizienzrevolution“) sind unumgänglich

- eine neue Infrastruktur zur systematischen Erschließung („strategisches Energiesparen“) von Energieeinsparpotentialen (Datenbasen für Schlüsseltechnologien und Kosten von NEGA-Watts, marktförmige Entscheidungs- und Umsetzungsinstrumente wie z. B. ‚Least-Cost Planning‘, neue Unternehmensziele von Energiedienstleistungsunternehmen),
- eine grundlegende Neuorientierung von Forschung und Entwicklung, der Ingenieurausbildung und des technischen Weltbildes auf die Nutzungsoptimierung von Energie statt auf die Ausweitung des Energieangebots,
- ein durch die öffentliche Energieaufsicht zu gewährleistender Vorrang von Investitionen in rationellere und regenerative Energienutzung.

Die notwendige energiepolitische Weichenstellung wird jedoch seit Jahren mit dem gleichen Argumentationsmuster blockiert: Zunächst wird bestritten, daß die vorhandenen technischen Potentiale rationellerer Energienutzung auch praktisch umsetzbar sind. Dann wird gesagt: Solange die Alternativen für die Kernkraft nicht praktisch verfügbar sind, könne nicht ausgetrieben werden. Mit einem klassischen Zirkelschluß ist damit ‚bewiesen‘: Alles muß so bleiben wie es ist.

Die bisherige Erfahrung mit der angebotsorientierten Politik und der sie legitimierenden Energieszenarien führen uns jedoch zu einer gegenteiligen Schlußfolgerung. Die Atomenergie und ihr Großkraftwerks- und Verbundsystem wirken de facto als Innovations- und Investitionsbarriere. Der Markt für Energietechniken (wie auch generell der Markt für Umweltschutztechnik) war schon immer und ist in Zukunft verstärkt ein mit politischen Mitteln geschaffener Markt. So wie die Atomkraft nur politisch und vor allem mit einer beispiellosen staatlichen Kapitaleinsatz durchgesetzt werden konnte, so brauchen alle Alternativen zur Atomkraft politische Grundsatzentscheidungen und entsprechende Rahmen- und Förderbedingungen.

### 9.3 Systemzwänge des atomaren Großverbund-Systems

Die Atomenergie ist mit dem Konzept einer angebotsorientierten Energiepolitik untrennbar verbunden. Die Funktionsprinzipien eines Großkraftwerks- und Verbundsystems mit Atomenergie sind für das gesamte – vor allem für das leitungsgebundene – Energiesystem strukturprägend. Dies betrifft z. B. die Einsatzchancen von rationellerer Stromnutzung, KWK und Regenerativen direkt. Über die stromseitig einfließende Nah- und Fernwärme-Politik werden indirekt aber auch der Marktanteil von Öl, Gas sowie die Einsatzchancen rationellerer Wärmenutzung mitbestimmt.

Die immanente Funktionslogik des großtechnischen (atomaren) Großkraftwerks- und Verbundsystems wird durch folgende technische, betriebswirtschaftli-

che und organisatorische Systemzwänge beherrscht, die eine fokierte Effizienzstrategie unwahrscheinlich machen (Hennicke 1989).

- Die Konzernstrukturen von AKW-Betreibern sind für eine nur örtlich mögliche Mobilisierung vieler CO<sub>2</sub>-Reduktionspotentiale (kommunale und industrielle Nah-, Fern- sowie Abwärme, Regenerative und insbesondere Energiesparen) kontraproduktiv. Deren Realisierung verlangt eine kleinräumige Erfassung und Umsetzung durch kommunale/regionale Energiekonzepte. Ein großer Stromverkäufer wie z. B. die Preussen Elektra hat daran kein Interesse. Eher schon eine von Preussen Elektra belieferte Stadt wie Bremen. Nach Studien des ‚Bremer Energiebeirats‘ könnten hier durch eine Effizienzstrategie bis 2010 etwa 40 Prozent CO<sub>2</sub> eingespart, 1 800 Dauerarbeitsplätze geschaffen und dennoch der Gewinn der Stadtwerke gesteigert werden (BEB 1989; Spitzley/ Hennicke 1990).
- Die fixkostenintensive Kostenstruktur von Atomkraftwerken zwingt betriebswirtschaftlich zu ständiger Vollauslastung. Dadurch besteht ein hoher ökonomischer Anreiz, Absatzmärkte aggressiv zu erobern und zu verteidigen, d. h. die Ausschöpfung von Energiesparpotentialen durch die Kunden oder den Marktzutritt für Newcomer (für Heizkraftwerke und Regenerative) zumindest nicht aktiv zu fördern.
- Die langen unflexiblen Planungs- und Bauzeiten für Großkraftwerke (ohne simultane offensive Einsparplanung und -förderung) und die wegen der Blockgrößen notwendig angehobenen Resermargen (25 statt 8 Prozent) verstärken den systemimmanenten Trend zu Überkapazitäten und zu höheren (als bei dezentraler und rationellerer Stromerzeugung notwendig) Kapazitätswachsen
- Leichtwassereaktoren (LWR) sind im großen Maßstab nur für reine Stromerzeugung und nur in der Grundlast wirtschaftlich einsetzbar. Auch der nach Betreiberzahlen errechnete Kostenvorsprung von Atomstrom gegenüber Steinkohlestrom (reine Stromerzeugung) verkehrt sich ab einer Ausnutzungsdauer von unter 4000 Stunden ins Gegenteil. LWR sind daher nur für den sehr geringen Anteil des stromspezifischen Endenergieverbrauchs (ca. 8 Prozent für Licht, Antrieb, Kommunikation und einige Formen von Prozeßenergie z. B. Elektrolyse) und keinesfalls für den weit überwiegenden, aber auf den Winter begrenzten Wärmebedarf eine wirtschaftlich in Frage kommende CO<sub>2</sub>-Reduktionstechnik. Jede Kilowattstunde Atomstrom bedeutet zudem tendenziell die Verhinderung von Heizkraftwerken, die – nach der Effizienzsteigerung – die wirtschaftlichste Form der CO<sub>2</sub>-Reduktion durch gleichzeitige Erzeugung von Strom- und Nah- bzw. Fernwärme darstellen.

#### 9.4 Kein rentabler ‚Platz‘ für wirtschaftliche CO<sub>2</sub>-Minderung

Eine mehrheitsfähige Klimastabilisierungspolitik muß die grundlegenden energiewirtschaftlichen Rahmen-

bedingungen berücksichtigen. Hierzu gehört in der Bundesrepublik vor allem die Frage, wie in einen schon jetzt weit überdimensionierten Kraftwerkspark im großen Umfang CO<sub>2</sub>-Reduktionspotentiale wirtschaftlich integriert werden können und wie die zukünftige Form (KWK oder nur Verstromung) des Kohleeinsatzes aussehen soll. Denn für mindestens ein Jahrzehnt ist auf dem Strommarkt kein (rentabler) Platz für innovative CO<sub>2</sub>-Reduktionstechnologien (Effizienz, Regenerative, Heizkraftwerke), solange nicht ein Teil der Angebotskapazität stillgelegt wird. Die insbesondere durch den Ausbau der Atomkraft systematisch verursachten Strom-Überkapazitäten (mindestens 10 GW) wirken de facto als Investitionsblockade auch wirtschaftlicher CO<sub>2</sub>-Reduktionstechniken. Dies zeigt ein Blick auf den ‚Strommarkt 2000‘ (vergl. Schaubild).

Das Schaubild zeigt, daß

- die im Jahr 1990 installierte Kraftwerksleistung (brutto, nach Prognos/ISI/1989) ausreicht für eine Stromnachfrage von 463 TWh (Status-Quo) in 2000 und zur Befriedigung dieser Nachfrage nur Ersatzinvestitionen notwendig sind,
- für die umfangreichen CO<sub>2</sub>-Reduktionspotentiale (Stromsparen, KWK, Regenerative) unter den heutigen Bedingungen für absehbare Zeit keine rentable Verwertungsmöglichkeit besteht,
- auch die in der Reduktionsszenarien ‚Energiepolitik‘ bzw. ‚Kernenergieausbau‘ unterstellten zusätzlichen Stromkapazitäten (Heizkraftwerke, Regenerative) ohne eine Bereinigung der Überkapazitäten nicht rentabel auf dem Markt unterzubringen sind,

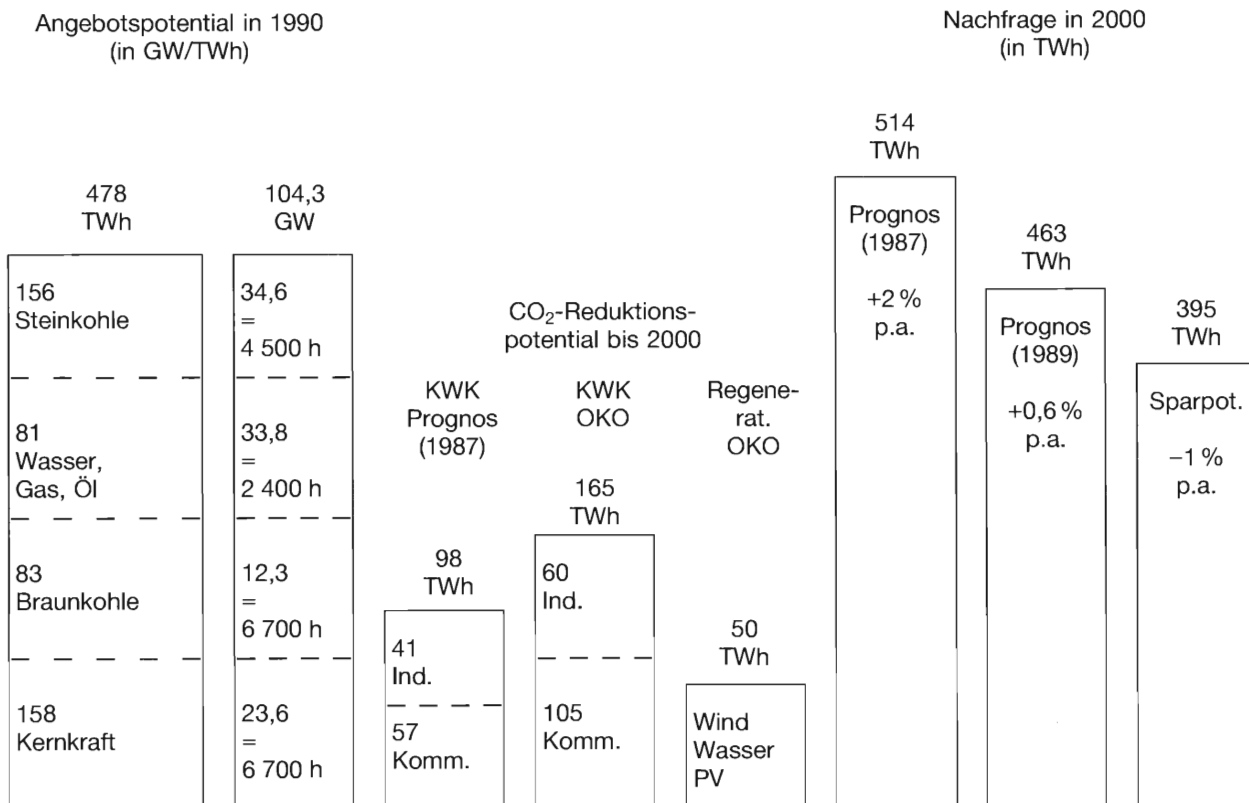
Im Gegenteil dominiert bei den Betreibern das starke betriebswirtschaftliche Motiv, Stromsparmaßnahmen zumindest nicht aktiv zu fördern und den Marktzutritt für Newcomer zu erschweren (z. B. durch prohibitive Einspeisebedingungen und Lockvogelangebote in Liefer- und Konzessionsverträgen).

Dies kommt auch in der VDEW-Modellrechnung zum CO<sub>2</sub>-Problem (1990) zum Ausdruck, nach der sich die Elektrizitätswirtschaft „nach sorgfältiger Prüfung“ bis zum Jahr 2005 nur zu einer Senkung von 12 % CO<sub>2</sub> (bezogen auf 1988) in der Lage sieht. Es ist bezeichnend, daß dieses Ergebnis insbesondere durch „optimale Ausnutzung“ bestehender Atomkraftwerke (+21 TWh) und nur sehr beschränkt durch den Ausbau von KWK (Fernwärme +2 % p.a.) und der regenerativen Energiequellen (rd. 6 TWh) erzielt wird.

#### 9.5 Ausstieg aus der Kohle statt aus der Atomenergie?

Strategien, die eine Klimaschutzpolitik in der Bundesrepublik mit der Fortschreibung der derzeitigen Atomkraftkapazität oder gar mit einem Ausbau verbinden wollen, rechnen mit einer deutlich höheren Kohleverdrängung als bei einem Ausstieg aus der Atomkraft. Das Argument der bestehenden Investitionsblockade wird faktisch gegen die Kohle ‚gedreht‘: Nur der (weitgehende) Ausstieg aus der Kohle schafft Ausbaumöglichkeiten für die Atomenergie

### Die Situation auf dem Strommarkt zwischen 1990 und 2000



Quelle: Prognos 1987 und Prognos/ISI 1989

und damit weniger CO<sub>2</sub>. Auf dem Papier ist dieses Argument so einleuchtend wie trivial. Tatsächlich wäre diese Strategie jedoch weder aus Gründen der CO<sub>2</sub>-Minderung notwendig, noch wegen der sozialen und regionalen Folgen zu vertreten. Dies wäre auch volkswirtschaftlich sowie industrie- und forschungspolitisch eine wenig Überzeugende CO<sub>2</sub>-Minderungsstrategie:

1. Die industrie- und forschungspolitischen Argumente wurden erstmalig in der bereits angeführten Prognos-Studie (1987) analysiert.

Bei einer Abwägung der wirtschaftsspezifischen Auswirkungen eines Szenarios mit oder ohne Kernenergie kommt Prognos insbesondere hinsichtlich der Exportmärkte zu dem Ergebnis: „Was die Exportchancen deutscher Kraftwerkshersteller angeht, wird damit klar, daß die entscheidenden Zukunftsmärkte eher im Produktionsbereich ‚konventionelle, rationelle Erzeugungsanlagen‘ und im Bereich ‚Angepaßte dezentrale Anlagen zur Nutzung regenerativer Energien‘...liegen werden. Ein Verzicht auf die Kernenergie in der Bundesrepublik trifft damit, was die Exportchancen der Kraftwerkshersteller angeht, auf ein ohnehin kleines Potential. Beeinträchtigungen in diesem Bereich können durch den Zugewinn der oben genannten Art überkompensiert werden“.

Die vergleichende Abwägung der ‚Innovationsakzeleratorwirkung‘ eines Szenarios mit und ohne Kernenergie hat zum Ergebnis: „Geht man von der Vielfalt und der möglichen Zahl von Innovationsanstößen aus, so zeigt sich, daß die energiepolitische Strategie, die auf eine rationelle Energieerzeugung und -verwendung unter Vermeidung der Kernkraftnutzung setzt, ein höheres Potential an Innovationsanstößen enthält. Der Zwang zur Nutzung unterschiedlichster Primärenergien ebenso wie die breiten Anstöße zur Entwicklung neuer Prozesse und Formen in der Energieeinsparung machen dies deutlich.“

Diese positiven spin-off- und spill-over-Effekte einer neuen klima- und umweltverträglicheren Technologiebasis in der Bundesrepublik und ihre Bedeutung auch für die Exportmärkte – insbesondere auch für die Dritte. Welt und für die Schwellenländern – werden häufig übersehen. Im Gegensatz zu den technisch und wirtschaftlich auch unter günstigsten Bedingungen stets sehr beschränkten Atomtechnologie-Märkten, werden die Märkte für energieeffiziente Technologie, für relativ umweltfreundliche Kohle-Heizkraftwerke, für Wind- und Solarenergie nahezu überall in der Dritten Welt expandieren. Ein Technologietransfer in Länder wie China und Indien mit den modernsten Kohlenutzungstechniken bildet wahrscheinlich so-

gar eine Grundbedingung für eine weltweite Klimastabilisierungspolitik. Ein ‚technologischer Fadenriß‘ bei der Entwicklung hocheffizienter und relativ umweltfreundlicher Kohlenutzungstechniken durch einen weitgehenden und schnellen Kohleausstieg im traditionellen Kohleland Bundesrepublik wäre indirekt für die Dritte Welt unvergleichlich folgenreicher als der Verzicht auf die für die Entwicklungsländer ohnehin nicht finanzierbare Atomenergie. (ESMAP 1989)

2. Es muß davon ausgegangen werden, daß bei einer starken und kurzfristigen Zurückdrängung der Steinkohle erhebliche negative Effekte auf Arbeitsmarkt und Regionalwirtschaft zumindest in den ‚Kohleländern‘ NRW und Saarland auftreten würden. Selbst ein allmähliches Zurückfahren der Fördermengen auf die von der Mehrheit der Mikat-Kommission vorgeschlagene Fördermenge von 55 Mio. t (bzw. 35 Mio. t zur Verstromung) führt bereits zu erheblichen Anpassungsproblemen. Sowohl im Reduktionsszenario ‚Energiepolitik‘ als auch insbesondere ‚Kernenergieausbau‘ würden jedoch die Steinkohlemengen deutlich unter die Mikat-Empfehlung absinken. Vor allem würde mit einem weitgehenden Ausstieg aus der Kohle die Option ‚focierter Ausbau der Nah- und Fernwärme‘ auf Basis relativ umweltverträglicher neuer Kohle-Heizkraftwerkstechnik zumindest erheblich behindert.

Dagegen wären – zumindest zum damaligen Zeitpunkt (1986/87) – nach dem Prognos-Szenario (1987) die wirtschaftlichen Auswirkungen eines Kernenergieverzichts positiv zu bewerten, denn bis zum Jahr 2000 stiege „das Beschäftigungsniveau anhaltend um netto 90 000 bis 135.000 (Dauer-) Arbeitsplätze“ (Prognos). Ein weitgehender Kohleausstieg und Ausbau von Atomkraft bedeutete dagegen zusätzlich zur Steigerung der atomaren Risiken eine tiefe Strukturkrise für die Kohlereviere und eine kostenaufwendige Strombeschaffung durch den Verzicht auf KWK-Kohlestrom zugunsten teurerer Atomkraftwerke.

Ein riskantes Kohleausstiegs- und Atomausbau-Szenario ist für die Bundesrepublik weder eine volkswirtschaftlich sinnvolle, noch eine zur CO<sub>2</sub>-Minderung notwendige Energiestrategie. Im Gegenteil: Der Einsatz von Kohle (und Gas) in Heizkraftwerken und nicht die Atomenergie ist unter den konkreten energiewirtschaftlichen Rahmenbedingungen in der Bundesrepublik die klima-, umwelt- und sozialverträglichere Übergangstechnologie zur Sonnenenergie-Wirtschaft.

### III. KLIMASCHUTZ UND VERKEHRSPOLITIK

Ein besonderer Schwerpunkt im Rahmen der Klimaschutzpolitik ist die Umgestaltung des Verkehrssektors nach umweltverträglichen Zielsetzungen. Im Gegensatz zu anderen Bereichen der Energienachfrage verzeichnet der Verkehrssektor weiterhin sehr hohe Zuwachsraten. Besonders der PKW-, LKW- und Flugverkehr haben ungebrochen hohe Wachstumsraten.

Der Anteil des Verkehrssektors an der Energienachfrage hat sich in den letzten 30 Jahren von ca. 15 auf über 25 Prozent erhöht. Beim Flugverkehr muß bis zum Jahr 2005 nahezu mit einer Verdoppelung des Aufkommens gerechnet werden.

Die (auch prozentual im Vergleich zum Wachstum anderer Energiesektoren) steigende Umweltbelastung geht vor allem auf den motorisierten Individualverkehr zurück, obwohl insbesondere die auf der Straße transportierte Gütermenge und der Flugverkehr ebenfalls gewaltig angestiegen sind. Insbesondere beim LKW-Verkehr ist mit einem weiterhin hohem Wachstum zu rechnen, was vor allem auf die Zunahme im grenzüberschreitenden Güterverkehr und neue Logistik-Konzepte in der Warenhaltung („Just in Time“) zurückzuführen ist.

Der Trend zum PKW ist ungebrochen: Am 1.7.1989 wurden in der Bundesrepublik 34,5 Mio. Kraftfahrzeuge registriert, davon waren knapp 29,8 Mio. PKW. Nach den Prognosen ist bis Ende des Jahrzehnts mit einer weiteren Zunahme um 5 bis 6 Mio. zu rechnen. 42 Prozent aller PKW-Fahrten liegen unter 4 km, rund 45 Prozent der Autonutzung entfällt auf die Freizeit.

Was in den letzten 15 Jahren an motor- und fahrzeugtechnischen Verbesserungen erreicht wurde, hat das Wachstum im Fahrzeugbestand, leistungsstärkere Motoren (Anstieg von 1970 bis 1988 von 53 auf 79 PS) sowie höhere Durchschnitts- (Zunahme derzeit 1 km/h/a) und Spitzengeschwindigkeiten (Zunahme derzeit 1,5 km/h/a) sogar überkompensiert.

Der Autoverkehr ist mit dieser Entwicklung zunehmend zum größten Umweltverschmutzer geworden. Ohne einschneidende Änderungen durch eine Zurückdrängung des überbordenden Individualverkehrs ist in der Bundesrepublik keine erfolgreiche Klimaschutzpolitik möglich. Bei einem anhaltenden Trend würden die Kohlendioxid-Emissionen aus dem Verkehrssektor bis zum Jahr 2005 um weitere 27 Mio. t ansteigen (23 Prozent höher als 1987). Dies ist auf keinen Fall hinzunehmen, wenn sich die Umweltpolitik selber ernst nimmt. Je länger jedoch gewartet wird, desto einschneidender müssen zu einem späteren Zeitpunkt die Maßnahmen ausfallen.

#### 1. Umorientierung in den verkehrspolitischen Zielsetzungen

Für den Verkehrssektor ist eine grundsätzliche Neuorientierung notwendig – mit der Zielvorgabe, ein möglichst umwelt- und klimaverträgliches Verkehrssystem zu schaffen. Dafür muß das derzeit oberste Prinzip der Verkehrspolitik nach ‚Schaffung der Voraussetzungen für möglichst kostengünstige Verkehrsabläufe‘ aufgegeben werden. Verkehrsdienstleistungen müssen sich am Ziel der ‚Umweltverträglichkeit‘ ausrichten. Hierfür werden erste Konkretisierungen und ein Maßnahmenkatalog als Ausgangspunkt einer umweltverträglicheren Verkehrspolitik vorgelegt.

Die Weichen für eine Neuordnung müssen auf allen Ebenen gestellt werden. Die Ziele sind:

- Verkehr vermeiden,
- Verkehr verlagern,

- bessere Technik einsetzen und
- Verkehrslenkung und Verkehrsberuhigung.

Die Studien belegen, daß bei der Ausschöpfung der politischen Gestaltungsmöglichkeiten eine Absenkung der Energienachfrage im Verkehrssektor um 25 Prozent bis zum Jahr 2005 durchaus machbar ist:

#### a) Minderung der PKW-Emissionen

Bei Nutzung des technisch möglichen Einsparpotentials ergibt sich eine Verringerung bei Kohlendioxyd um 50 bis 60 Prozent für die nächsten 20 Jahre.

#### b) Minderung der PKW-Verkehrsleistungen

Durch bessere Auslastung der Fahrzeuge, siedlungs- und raumordnungspolitische Maßnahmen und Verbesserung der öffentlichen Infrastruktur im Nah- und Fernbereich können die Verkehrsleistungen um rund 20 Prozent gesenkt werden.

#### c) Minderung der LKW-Emissionen

Bei Nutzung des Energieeinsparpotentials sind Reduktionen der Kohlendioxyd-Emissionen zwischen 20 und 30 Prozent bis zum Jahr 2005 erreichbar.

#### d) Minderung der LKW-Verkehrsleistungen

Vor allem durch verkehrs- und preispolitische Regulierungen können die Verkehrsleistungen gegenüber dem Trend-Szenario deutlich begrenzt werden. Bei einer Verlagerung erweist sich kurzfristig allerdings die unzureichende Infrastruktur bei der Deutschen Bundesbahn als ein erhebliches Hemmnis. Dennoch ist auch hier bis zum Jahr 2005 eine Verringerung der Verkehrsleistungen um 25 Prozent durchaus möglich.

#### e) Minderung der Flugemissionen

Das technische Energieeinsparpotential bei Flugzeugen liegt zwischen 50 und 60 Prozent bis zum Jahr 2005. Als Zielvorgabe kann eine Absenkung des durchschnittlichen Kraftstoffverbrauchs für Flugzeuge auf deutschen Flughäfen von rund 30 Prozent aufgestellt werden.

#### f) Minderung der Flugverkehrsleistungen

Bis zum Jahr 2005 sollen 60 Prozent des Aufkommens im innerdeutschen Flugverkehrs auf die Schiene verlagert werden.

## 2. Maßnahmen zur Ausschöpfung des technischen Minderungspotentials

- *Flottenverbrauchsregelung:* Ab 1992 wird für die Hersteller von PKW eine Absenkung des durch-

schnittlichen Benzinverbrauchs der jeweiligen Flotte um mindestens 5 Prozent pro Jahr vorgeschrieben. Damit läßt sich eine ca. 50 prozentige Kraftstoffabsenkung bei den Neuzulassungen bis 2005 erreichen. Gleiches Minderungsziel wird für die Neuzulassung jeweiliger LKW-Flotten gefordert.

- *Höchstverbrauchsregelung:* Bei PKW- und bei LKW-Motoren wird unabhängig von der Regelung des Flottenverbrauchs ein absoluter Höchstverbrauch gesetzlich festgesetzt, der im Abstand von 3 Jahren im Verhältnis zum geringeren Flottenverbrauch abgesenkt wird. Als Berechnungsgrundlage für den Benzinverbrauch ist die Neubestimmung des Fahrzyklus notwendig.
- *Technische Tempobegrenzung:* Obligatorische Einführung des Tempobegrenzers für PKW, LKW und Busse. Bei LKW und Bus ist gleichzeitig die obligatorische Einführung erweiterter Fahrtenstreifen vorzusehen.
- *Partikelfilter* in LKW und Bussen.
- *Dynamische Absenkung* der Schadstoffgrenzen für PKW und LKW.

## 3. Maßnahmen zur Gestaltung des Verkehrsablaufs

*Tempolimit:* Alle wirksamen Reduktionsszenarien haben Tempobegrenzungen zur Voraussetzung:

- 100/80/30 für PKW,
- 80/60/30 für LKW,
- Nachtfahrbegrenzungen.

Gleichzeitig ist eine bessere Überwachung in der Einhaltung der Tempobegrenzungen notwendig.

*Verstetigung des Verkehrsflusses:* Parkleitsysteme, Signalsteuerungen an den Knotenpunkten, Fahrstreifensignalisierungen und Stauwarnungen sowie Wechselwegweisungen und Wechselverkehrszeichen sind Maßnahmen, den Verkehrsfluß zu ‚verstetigen‘ und intelligent zu lenken. In den Reduktionsszenarien der Energiekoordinatoren sind großflächige Verkehrslenkungssysteme nicht berücksichtigt worden.

## 4. Korrekturen im Preisgefüge

Die Mineralölsteueranhebung ist ein entscheidender Hebel für eine Klimaschutzpolitik. Bei den heutigen Benzinpreisen besteht für die Ausschöpfung des technischen Einsparpotentials kein günstiges Kosten-Nutzen-Verhältnis. Deshalb ist eine deutliche Anhebung der Mineralölsteuer unverzichtbar. Einer entsprechenden Anhebung wird auch eine erhebliche Wirkungsintensität für eine Veränderung im Modal Split zugeschrieben. Weitere Maßnahmen sind:

- Schwerverkehrsabgabe,
- Straßenbenutzungsgebühren,
- Begrenzung der Abschreibungsmöglichkeiten für geschäftlich genutzte PKW.

## 5. Maßnahmen zur Beeinflussung des Modal Split

### a) Personenverkehr von Straße auf Schiene/ÖV

- Generell: Einführung der Trennungsrechnung bei der Deutschen Bundesbahn und Übernahme der Infrastrukturkosten im Streckennetz,
- Umwandlung der Kilometerpauschale in eine Entfernungspauschale,
- Vorrechte für Fahrgemeinschaften im Ortsverkehr,
- Verknappung und Verteuerung von Parkraum in Innenstädten,
- generelle Parkraumbewirtschaftung,
- Tarifsenkungen für den ÖPNV/Einführung von Umweltkarten,
- räumliche und zeitliche Fahrverbote,
- Ausweitung verkehrsberuhigter Zonen,
- Beschleunigung des Öffentlichen Personenverkehrs durch Taktverdichtung, Sonderspuren, bevorzugte Signalschaltungen, etc.
- Rück- und Umbau von Straßenflächen zugunsten der nicht-motorisierten Verkehrsteilnehmer.

### b) Reduktion Flugverkehr und verlagerung auf die Schiene

- Angebotsbeschränkungen im Regionalverkehr,
- Verbot von Stratosphärenflügen,
- Festlegung dynamischer Schadstoffgrenzen für die Emissionen des Luftverkehrs,
- Nachtflugverbot,
- Erhöhung/Staffelung der Start- und Landegebühren auch nach Umweltbelastungen,
- technische Auflagen,
- Umlegung der Flugsicherungskosten,
- Mineralölsteuer auf Flugbenzin.

### c) Güterverlagerung auf die Schiene

Auch hier hat die Erhöhung der Kraftstoffpreise eine erhebliche Wirkungsintensität. Weitere Maßnahmen sind:

- progressive Besteuerung der Kohlendioxid-Mengen in der Kfz-Steuer,
- Straßenbenutzungsgebühr,
- erweiterte Fahrtenschreiber,
- Aufhebung der Regulierungen für den Werkverkehr,
- Leerfrachten Börse,
- Güterverteiler-Zentrale,
- Ausbau Container-Infrastruktur.

- Verbesserung des Güterverkehrs bei der Deutschen Bundesbahn und schrittweise Einführung von Verladepflichten ab einer bestimmten Entfernung.

Gleichzeitig sind spezifische Rahmenbedingungen für den LKW-Verkehr zu verändern, wie

- verschärfte Sicherheitsanforderungen für den Transport gefährlicher Güter,
- Prüfung von Konzessionen für LKW entsprechend der Einhaltung von Umweltstandards,
- bessere Sozialvorschriften über Lenk- und Ruhezeiten.

### Zusatzvotum des Kommissionsmitglieds Dr. Knabe zu Abschnitt E: „Nationales Vorgehen zur Reduktion energiebedingter klimarelevanter Spurengasemissionen“

Für eine wachsende Zahl von Menschen gibt es keinen Zweifel, daß die Erhaltung der natürlichen Lebensgrundlagen absolute Priorität besitzen muß. Sie fordern und sie sind selbst bereit, angesichts der sich anbahnenden dramatischen Klimaveränderungen jeden notwendigen Beitrag zum Schutz von Klima und Erdatmosphäre zu leisten.

Eine verantwortungsvolle Vorsorgepolitik darf ihr Ziel nicht verfehlen, indem sie keine hinreichenden Vorkehrungen gegen drohende Gefahren trifft. Vorsorgemaßnahmen, die auch nur ein wenig zu schwach sind oder ein wenig zu spät kommen, verfehlen unter Umständen den angestrebten Erfolg – menschenwürdiges Überleben und Fortbestand aller Ökosysteme. Eine halbherzige Vorsorge könnte die globale Erwärmung vielleicht abschwächen, aber dramatische Folgen für Mensch und Natur nicht verhindern.

Sowohl die Langsamkeit politischer Prozesse als auch die Unsicherheit über die zum Schutz der Erdatmosphäre unbedingt notwendigen Maßnahmen gefährden den Erfolg der noch in den Anfängen stehenden Vorsorgepolitik. Wir wissen weder mit Sicherheit, ob die Folgen des menschengemachten Treibhauseffektes tatsächlich so bedrohlich ausfallen noch ob unsere Befürchtungen sogar weit übertroffen werden. Die wissenschaftlichen Vorhersagen benennen lediglich eine, wenn auch sehr plausible, Bandbreite der zu befürchtenden Veränderungen.

Eine Politik, die nur mit einer gewissen Wahrscheinlichkeit den Temperaturanstieg in erträglichen Grenzen halten würde, wird der Herausforderung nicht gerecht. Notwendig ist vielmehr eine Vorsorgepolitik, die alle gewaltfreien Möglichkeiten ausschöpft, um den menschengemachten Treibhauseffekt soweit einzudämmen, daß die Folgen für Mensch und Natur minimal bleiben.

Aus diesem Grunde werden hier Schutzziele vorgeschlagen, die über die als größter gemeinsamer Nenner formulierten Empfehlungen der Enquete-Kommission hinausgehen.

Nach wie vor erscheint es notwendig, die Emissionen atmosphärensicherlicher Substanzen so zu vermin-

dern, daß mindestens das Ziel der Klimakonferenz von Toronto 1988 erreicht wird. Bis zum Jahr 2005 sollten die Kohlendioxid-Emissionen global um 20 Prozent verringert werden. Darüber hinaus sollten die Emissionen der ozonabbauenden Schadstoffe sogar schon Mitte der neunziger Jahre gegen Null gedrückt werden. Für andere klimawirksame Gase sind ebenso drastische Einschränkungen notwendig.

Aus der Sicht eines konsequenten Klimaschutzes wären für die Bundesrepublik Deutschland folgende, die konsensualen Empfehlungen der Enquete-Kommission übertreffenden Minimalziele (soweit zutreffend gegenüber 1987) erforderlich:

- Reduktion der CO<sub>2</sub>-Emissionen bis 2005 um 35 %, bis 2010 um 47 %,
- Sofortverbot von FCKW und anderen ozonschädigenden Substanzen (mit strengen Ausnahmeregelungen),
- Reduktion der CH<sub>4</sub>-Emissionen um 50 %, der NO<sub>x</sub>-Emissionen um 70 Prozent, der CO-Emissionen um 80 % und der NMVOC-Emissionen um 90 % bis 2005,
- Stabilisierung und mittel- bis langfristige Erhöhung des in Land- und Forstwirtschaft und Natur gebundenen Kohlenstoffs,
- Unterlassung aller Beiträge zur Zerstörung der Tropenwälder und umfangreiche Unterstützung des Verzichts auf die Nutzung der tropischen Wälder, und
- Minderung radioaktiver Gefahren durch Sofortausstieg (bis 1991) aus der Atomenergie.

Diese Empfehlungen streben aus Gründen maximaler Vorsorge und zur Verstärkung einer möglichen deutschen Vorreiterrolle die Realisierung der konsensualen Ziele der Enquete-Kommission etwa zehn bis fünfzehn Jahre früher an (im Konsens wird etwa eine minimale Reduktion von CO<sub>2</sub> bzw. Methan um 50 % erst für 2020 gefordert).

Erforderlich ist eine umfassende Verminderung aller Risiken für die Erdatmosphäre – einschließlich der atomaren Gefahren. Der Atomausstieg muß sofort erfolgen, und nicht erst, nachdem etwa ein weiterer Super-GAU eingetreten ist.

Diese weiterreichenden Ziele können bei Anspannung aller Kräfte als realisierbar angesehen werden. Für die CO<sub>2</sub>-Minderungsziele bei Sofortausstieg aus der Atomenergie wird dies durch eine Studie des Öko-Instituts nachgewiesen.

Unter bestimmten Umständen erscheinen noch höhere Reduktionen klimawirksamer Schadstoffe möglich. So liegt sowohl der genannten Studie des Öko-Instituts als auch den Studien der Enquete-Kommission die Annahme eines relativ hohen Wirtschaftswachstums zugrunde (Öko-Institut durchschnittlich 2,4 % jährlich, Studienpaket der Kommission rund 50 % bis 2005). Wäre das jährliche Wirtschaftswachstum in diesen Studien auch nur um Promillebeträge niedriger angesetzt worden, so hätten sich gleich um mehrere Prozent größere Reduktionspotentiale ergeben. Bei Veränderungen wichtiger Rahmenbedingun-

gen (Wachstum, Verwertungsmechanismen, Wertewandel und Konsummuster) erscheinen also noch deutlich höhere Reduktionen klimawirksamer Schadstoffe möglich.

Die Vorsorge zum Schutz der Erdatmosphäre wird damit nicht nur zum Schwerpunkt von Umwelt-, Energie-, Technologie- und anderen Sektorrichtlinien, sondern zur grundlegenden Herausforderung an die industrielle Wachstumsgesellschaft. Es ist längst überfällig, etwa in der Bundesrepublik Deutschland das „Stabilitäts- und Wachstumsgesetz“ aufzuheben, damit Atmosphärenschutz nicht am festgeschriebenen Dogma des „stetigen Wachstums“ scheitert. Das in der Bundesrepublik praktizierte Wachstumsmodell, das die sozialen Gegensätze in der Gesellschaft durch die Verteilung eines wachsenden Mehrprodukts abdämpft, muß grundlegend neu überdacht werden. Damit bekommt für die Sicherung einer menschenwürdigen Existenz und sozialer Gerechtigkeit die Schaffung von Verteilungsgerechtigkeit zwischen den sozialen Schichten und einer ausreichenden sozialen Grundsicherung noch größere Bedeutung.

Die Bundesrepublik muß durch eine konsequente Vorsorgepolitik beispielgebend werden, auch wenn es unter Umständen ihre Wettbewerbsposition in Frage stellt. So kann die Bereitschaft anderer Länder zu ähnlich weitreichenden Maßnahmen erhöht werden, denn es fehlt weltweit vor allem an Vorbildern. Auch gegenüber den Ländern der Dritten Welt wäre eine Schutzstrategie, die vor allem darauf bedacht ist, den Wettbewerbsvorsprung der Industrieländer zu erhalten, weder glaubwürdig noch verantwortbar.

Aufgrund dieser Überlegungen werden im folgenden detailliertere Vorschläge gemacht, die an Reichweite oder Präzision teilweise über die Kommissionsempfehlungen hinausgehen oder diese sinnvoll ergänzen. Details, die in diesem Rahmen nicht dargestellt werden können, sind unter anderem im Antrag „Umfassender Schutz der Erdatmosphäre und des globalen Klimas“ der Fraktion DIE GRÜNEN (September 1990) BT-Drucksache 11/7872 oder in anderen, jeweils angegebenen Bundestagsdrucksachen enthalten. Die folgenden Empfehlungen stellen häufig Forderungen dar, die von den Natur- und Umweltschutzbewegungen und den GRÜNEN bereits seit Jahren erhoben und vorangetrieben werden. Sie sollten sobald wie möglich umgesetzt werden.

### **I. Schaffung förderlicher rechtlichen Rahmenbedingungen**

Der Umweltschutz ist vorbehaltlos als Grundrecht und als Staatsziel im Grundgesetz der Bundesrepublik Deutschland zu verankern (vgl. Bundestags-Drucksache, BT-Drs., 11/663). Ferner ist das „Stabilitäts- und Wachstumsgesetz“ durch ein „Gesetz für eine ökologisch-soziale Wirtschaft“ zu ersetzen (vgl. BT-Drs. 11/7607). Dieses Gesetz soll die Bewahrung oder Wiederherstellung der ökologischen Grundlagen des Wirtschaftens (ökologisches Gleichgewicht) in den wirtschaftspolitischen Zielkatalog der Bundesregierung aufnehmen. Das Dogma des „stetigen Wachstums“ ist aus dem wirtschaftspolitischen Zielkatalog zu streichen.

## II. Verringerung der Emission klimawirksamer Schadstoffe durch energiepolitische Maßnahmen

Die im folgenden aufgeführten Handlungsempfehlungen entsprechen dem energiepolitischen Konzept der GRÜNEN, das auch der Studie „Das CO<sub>2</sub>-optimierte GRÜNE Energiewende-Szenario 2010“ (August 1990) des Öko-Instituts und der Stellungnahme des Unterzeichners zum Beitrag von Meyer-Abich und Heinloth über die Bewertung der Kernenergie in diesem Bericht zugrunde liegt. Hervorzuheben ist dabei einerseits, daß der sofortige Ausstieg aus der Atomkraftnutzung technisch möglich ist, und andererseits, daß bereits im Jahr 2010 der Anteil der regenerativen Energien am Primärenergieverbrauch in der BRD 17 % betragen kann.

### 1. Strukturelle Änderungen der Energiewirtschaft

- a) Der Sofortausstieg aus der Atomenergie ist wegen ihrer unmittelbaren Risiken unverzüglich einzuleiten und zu vollziehen durch die
- Verabschiedung eines Gesetzes zur Stilllegung aller Atomkraftwerke (vgl. BT-Drs. 10/1913),
  - Auflösung der bisherigen Reaktor- und Strahlenschutzkommission und Einberufung einer neuen Kommission für den Bereich Entsorgung, Stilllegung, Abwrackung und Endlagerkonzeptionierung,
  - Einsetzung eines aus Bundestagsparteien, Umweltverbänden, Gewerkschaften und Bürgerinitiativen paritätisch besetzten Gremiums zur Kontrolle der neuen Kommission, des Atomausstiegs und des Strahlenschutzes,
  - gesetzliche Sicherstellung der Finanzierung der Beseitigung der atomaren Altlasten durch die Betreiber,
  - Bereitstellung staatlicher Forschungsgelder im Nuklearbereich ausschließlich für den Zweck sicherer Entsorgungstechniken,
  - Initiierung und Unterstützung EG-, europa- und weltweiter Programme zum Ausstieg aus der Atomenergie, sowie durch die
  - Verabschiedung eines Moratoriums der Kernfusionsforschung (vgl. BT-Drucksache 11/6431).
- b) Die Energiewirtschaft ist umzustrukturieren und zu rekommunalisieren durch
- die Änderung des Energiewirtschaftsgesetzes in ein Energiespar- und -strukturgesetz (vgl. BT-Drucksache 11/6484), so daß insbesondere kommunale Strukturen zu Trägern von Energiedienstleistungsunternehmen werden. Diese sind am Bedarfs- statt Erwerbsprinzip, an der Nutzungs- statt Angebotsorientierung und am Prinzip der Partizipation und Demokratisierung auszurichten. Ein einzurichtender Energieplanungsrat soll den Übergang zu einer dezentralen Energiewirtschaft koordinierend begleiten.

- eine öffentliche Energieaufsicht, die die Umsetzung des Energiespar- und -strukturgesetzes überwacht,
- Priorität für Energieeinsparinvestitionen, bevor dann zur Deckung des Energiebedarfs alle Möglichkeiten des Einsatzes erneuerbarer Energien ausgeschöpft werden. An Stelle von Kondensationskraftwerken sollen soweit wie möglich Kraft-Wärme-Kopplungs-Anlagen gebaut werden.
- Das Gemeindeverkehrsfinanzierungsgesetz ist so zu novellieren, daß die kommunale Energieversorgung nicht mehr den öffentlichen Nahverkehr subventionieren muß.
- Das Kartellrecht ist so zu novellieren, daß die kommunale Eigenenergieversorgung und die Energielieferung an Dritte innerhalb des Kommunalgebietes ermöglicht werden.

### 2. Abkehr von der Energieverschwendung

- a) Die Energieeinsparung im Wärmemarkt muß vordringliche Aufgabe sein (vgl. BT-Drucksache 11/2318), hierbei ist insbesondere notwendig:
- der Aufbau eines flächendeckenden Netzes von kommunalen bzw. regionalen Energiesparagenturen,
  - ein umfassendes öffentliches Förderungsprogramm zur energetischen Sanierung des Gebäudebestandes (zur stufenweisen Angleichung an den Niedrigenergiehausstandard).
- b) Im Stromsektor sind vor allem
- der Neuanschluß von Elektroheizungen zu verbieten (vgl. BT-Drucksache 11/6727) und die Umstellung aller elektrischen Wärmeerzeugungsanlagen auf nicht-elektrische Wärmeerzeugung zu fördern,
  - eine Kennzeichnungspflicht über Energie- und Wasserverbrauch für Haushaltsgeräte einzuführen,
  - Gerätestandards einzuführen und Verbrauchsnormen so zu dynamisieren, daß sie dem Stand der Technik entsprechen.
- c) Grundlegende stromsparende Änderungen bei Produkten und Herstellungsprozessen sind zu fördern durch die Änderung ordnungs- und steuerrechtlicher Vorschriften und die Schaffung von Anreizen, so daß Produktumstellungen und Änderungen von Herstellungsprozessen erreicht werden. Ebenso sind Forschungsanreize zu verstärken.
- d) Beispielhafte Verringerung des Energieverbrauchs in öffentlichen Einrichtungen (Bund, Länder, Kommunen) um jährlich mindestens 3 %.

### 3. Effizienzsteigerung bei der Energieumwandlung und Nutzung der erneuerbaren Energien

- a) Die gesamte Energieprozeßkette muß optimiert werden (vgl. BT-Drucksache 11/4048). Die bisherige Kraftwerksstruktur ist zügig in eine Struktur



mit wesentlich höheren Wirkungsgraden umzuwandeln. Nur in begründeten Einzelfällen sind neue Kondensationskraftwerke genehmigungsfähig.

- b) Zur Förderung der erneuerbaren Energien sind Markteinführungshilfen als Investitionszuschüsse je Anlage zu zahlen. Netzanschlußkosten und Steuerungsanlagen sind überwiegend von den Energieversorgungsunternehmen zu tragen. In jeder Gemeinde sollen beispielhafte Demonstrationsanlagen bis zu voller Kostenhöhe gefördert werden.

#### 4. Verursachergerechte Energiepreisbildung

Die Energiepreise sind so anzuheben und die Energiepreisstruktur ist so zu verändern, daß externe Kosten der Energieerzeugung so weit wie möglich in die Preisbildung einbezogen werden.

##### a) Primärenergie- und Atomstromsteuer

Der Kohlepfeffig muß von einer Primärenergie- und Atomstromsteuer (solange noch Atomkraftwerke in Deutschland betrieben werden, vgl. BT-Drucksache 11/3655) abgelöst werden. Die Primärenergiesteuer wird nach dem Energiegehalt der Primärenergieträger berechnet, kann aber für einzelne Primärenergieträger je nach Emissionsbelastung und Ressourcenknappheit unterschiedlich hoch sein.

Vorgeschlagen wird eine Energiesteuer von 1,2 Pf./KWh, sowie eine Schadstoffabgabe für Großfeuerungsanlagen. Hierbei werden NO<sub>x</sub>-Emissionen mit 1 500 DM/t (innerhalb von 5 Jahren steigend auf 6 000 DM/t), SO<sub>2</sub>-Emissionen mit 1 500 DM/t (4 500 DM/t) und allgemeine Stäube mit 100–300 DM/t, Stäube der Klasse I nach TA Luft mit 37 500 DM/t, der Klasse II mit 7 500 DM/t und der Klasse III mit 1 500 DM/t belastet.

Obwohl das Mittelaufkommen aus diesen Steuern und Abgaben über 40 Mrd. DM beträgt, wird der durchschnittliche Energiepreis für den Endverbraucher um weniger als 10% erhöht. Um die notwendige Lenkungswirkung einer Energiesteuer zu erreichen, ist nach einer Einführungsphase eine Erhöhung (z. B. auf 5 Pf./KWh) zu prüfen.

Das Mittelaufkommen aus diesen Steuern und Abgaben soll zweckgebunden zur Förderung von Programmen zu rationeller Energienutzung sowie zur Markteinführung von regenerativen Energien verwendet werden.

##### b) Änderung der Bundestarifordnung Elektrizität

Die Stromtarife dürfen Energiemehrverbrauch nicht länger belohnen. Deshalb sind lineare Tarife notwendig. Die Tarifstruktur muß sich an die Erzeugungskosten anlehnen. Die hohen Kosten des Spitzenlaststromes müssen in begrenztem Umfang von den VerbraucherInnen direkt bezahlt und beeinflußt werden können. Daher sind lineare, zeitvariable Stromtarife einzuführen (vgl. BT-Drucksache 11/2079)

##### c) Änderung der Einspeisevergütung für erneuerbare Energien

Die Erzeugung von Energie aus erneuerbaren Energien muß intensiv gefördert werden. Hierzu muß die Einspeisung von Strom aus Regenerativ-Energieanlagen und Kraft-Wärme-Kopplungs-Anlagen unterstützt werden. Die Einspeisevergütung muß mindestens den langfristig vermiedenen Kosten eines neuen rauchgasentschwefelten Steinkohlekraftwerks entsprechen.

Bei Kleinanlagen bis 3 KW soll die Rückwärtseinspeisung durch den bestehenden Zähler jedem Haushalt und im Kleingewerbe ermöglicht werden (vgl. BT-Drucksache 11/6408).

### III. Verringerung der Emission klimawirksamer Schadstoffe durch verkehrspolitische Maßnahmen

#### A. Personenverkehr

Angesichts der prognostizierten starken Zunahme des Verkehr sind sowohl eine Verlagerung weg von umwelt- und klimaschädlichen Verkehrsmitteln als auch Maßnahmen zur Verringerung des Verkehrsaufkommens notwendig. Die technischen und wirtschaftlichen Möglichkeiten zur Erreichung dieser Ziele sind auszuschöpfen, soweit ein sinnvolles Verhältnis zwischen Aufwand und ökologischem Effekt besteht. Darüber hinaus ist es aber notwendig, das Verkehrsaufkommen auch an seinen Ursachen, den hohen Mobilitätsanforderungen und den Zwängen zur erhöhten Geschwindigkeit, zu untersuchen und einzugrenzen.

Die kurzfristig wichtigsten, klimarelevanten Erfordernisse sind:

1. der Deutschen Bundesbahn aufzuerlegen, einen flächendeckenden ÖPNV zu betreiben, indem sie
  - a) keine weiteren Strecken stilllegt oder zurückbaut oder Tarifpunkte aufgibt,
  - b) die Wiederinbetriebnahme stillgelegter Strecken prüft und mit den kommunalen Gebietskörperschaften nach regionalen Lösungsmöglichkeiten sucht.
2. der Deutschen Bundesbahn aufzuerlegen, daß sie das Angebot eines Halbpreispasses in ihr Tarifsystem aufnimmt (vgl. Drucksache 11/5922).

Durch beide Maßnahmen würden die CO<sub>2</sub>- und NO<sub>x</sub>-Emissionen des Verkehrs gesenkt.

Dem Ausbau des europäischen Hochgeschwindigkeitsschienennetz kommt in diesem Zusammenhang keine besondere Bedeutung zu. Wenn auch gelegentlich argumentiert wird, daß es zur Verringerung des Luftverkehrs beitragen könnte, so wiegt dieser hypothetische Vorteil doch kaum die zahlreichen Nachteile dieser Planungen auf. Der Luftverkehr kann mit den u. a. Maßnahmen schneller und wirksamer verringert werden.

3. die Straßenverkehrsordnung unverzüglich dahingehend zu ändern, daß auf den Bundesautobahnen

eine generelle Höchstgeschwindigkeit von 100 km/h und auf allen anderen Außerortsstraßen von 80 km/h gilt. Die Begrenzung der Fahrgeschwindigkeit ist klimarelevant, weil bei höheren Geschwindigkeiten wegen des im Quadrat der Geschwindigkeit wachsenden Luftwiderstands der Treibstoffverbrauch und die Schadstoffemissionen wachsen.

4. die Straßenverkehrszulassungsordnung dahingehend zu ändern, daß die Motorleistung der ab 1. 1. 1992 neu zugelassenen PKW auf maximal 50 kW begrenzt wird, weil höhere Motorleistungen in der Regel mit höherem Treibstoffverbrauch verbunden sind.
5. dem Bundestag unverzüglich Gesetzesentwürfe zur Novellierung folgender, auch klimawirksamer Gesetze vorzulegen:
  - a) Mineralölsteuergesetz; Ziel ist, durch die Anhebung des Steueranteils pro Liter Vergaser- und Dieselmotorkraftstoff in einem ersten Schritt um 1,00 DM, eine Verhaltensänderung weg vom Auto in Gang zu setzen. Durch weitere Erhöhungen um jährlich DM 0,50 und durch die Mineralölsteuerbefreiung für die Träger des ÖPNV (bzw. die Wiedereinführung der Gasölbetriebsbeihilfe) soll ein spürbarer Druck zur Emissionsminderung ausgeübt werden. Damit werden nennenswerte Verlagerungen vom motorisierten Individualverkehr zum nichtmotorisierten Verkehr und zum ÖPNV bewirkt, da die Mittel zum raschen Ausbau des ÖPNV benutzt werden sollen.
  - b) Personenbeförderungsgesetz; Ziel ist, die Kommunen und Kreise in die Lage zu versetzen, daß sie als Gebietskonzessionäre politisch über Art und Umfang ihres ÖPNV-Netzes entscheiden können (vgl. BT-Drucksache 11/6662).
  - c) Gemeindeverkehrsfinanzierungsgesetz; Ziel ist, durch die Aufhebung der Plafondierung von Bundesmitteln für die Länder zur Verbesserung der Verkehrsverhältnisse ihrer Gemeinden die Voraussetzungen dafür zu schaffen, daß die Kreise und Kommunen in den quantitativen und qualitativen Ausbau ihres ÖPNV-Netzes investieren können. Dazu sind den Ländern ab 1991 jährlich 3 Mrd. DM zweckgebunden für den ÖPNV zur Verfügung zu stellen.
6. dem Bundestag den Entwurf eines Gesetzes zur Besteuerung des Flugverkehrs vorzulegen; Ziel dieses Gesetzes ist es, durch Besteuerung der Flugtickets das weitere Ansteigen des klimaschädlichen Flugverkehrs zu verhindern und Anreize zur Verkehrsverlagerung auf die Schiene zu schaffen.
7. ein umfassendes Konzept vorzulegen und Sofortmaßnahmen zu ergreifen zur Förderung des nichtmotorisierten Individualverkehrs.

## B. Güterverkehr

Auch beim Güterverkehr sind die besonders klimaschädlichen Formen mit hohen CO<sub>2</sub>-, NO<sub>x</sub>- und Kohlenwasserstoffemissionen zurückzudrängen bzw.

durch Maßnahmen auf der Ebene der Entstehung des Güterverkehrs zu vermeiden.

1. Der Deutschen Bundesbahn sind ausreichende Mittel zur Ausweitung ihrer materiellen und personellen Kapazitäten zur Verfügung zu stellen; der Bund muß die Kosten für Bau und Unterhalt des Schienennetzes übernehmen und die Bahn fahrleistungsabhängig daran beteiligen. Die gesetzlich vorgesehene Straßenbenutzungsgebühr für LKW ist in eine fahrleistungsabhängige Schwerverkehrsabgabe umzuwandeln, von allen, auch von den inländischen Transportunternehmen wettbewerbsneutral, also ohne Ausgleich über die Kfz-Steuer zu erheben und so auszugestalten, daß in einem ersten, notwendigen Schritt eine hundertprozentige Wegekostendeckung erzielt wird. Die gesamtgesellschaftlichen Kosten des Güterverkehrs müssen von dessen Trägern nach dem Verursacherprinzip getragen und über die Frachtkosten den jeweiligen Verladern angelastet werden (vgl. BT-Drucksache 11/6831).
2. Es ist dafür zu sorgen, daß Güterfernverkehr ausschließlich auf Schienen und Wasserstraßen abgewickelt wird.
3. Bei der EG ist darauf hinzuwirken, Im- und Exportsubventionen abzubauen, damit Transporte zur Ausnutzung dieser Subventionen vermieden werden.
4. Der Flugfrachtverkehr ist wegen seiner besonders hohen Emissionen über eine drastische Einschränkung der Vergabe von Start- und Landerechten zu verringern.

## IV. Verbot von Fluor-Chlor-Kohlenwasserstoffen, anderen ozonschädigenden Substanzen und Fluorkohlenwasserstoffen

Die nationalen Beschlüsse bezüglich eines Ausstiegs aus der Produktion und Verwendung der FCKW, Halone sowie weiterer Stoffe greifen nicht schnell genug und sind unzureichend. Da zu befürchten ist, daß der Kabinettsbeschluß über die FCKW-Halon-Verbotsverordnung vom 30. 5. 1990 im Rahmen des EG-Verfahrens verzögert oder verhindert wird, ist eine entsprechende Verordnung in einem nationalen Alleingang umgehend in Kraft zu setzen.

Die Verordnung ist dahingehend zu erweitern, daß umgehend sowohl die Verwendung als auch die Produktion und der Import aller voll- und teilhalogenierten FCKW, aller Halone sowie von Tetrachlorkohlenstoff und Methylchloroform im gemeinsamen Staatsgebiet von Bundesrepublik Deutschland und DDR einzustellen sind. Ferner sind auch die chlorfreien FKW, die kein Ozonabbau-potential, aber ein ähnlich hohes Treibhauspotential wie die vollhalogenierten FCKW haben, in die Regelung einzubeziehen.

Vor der Verwendung von FKW als Ersatzstoffe für eine kurze Übergangszeit ist deren toxikologische Umbedenklichkeit und Umweltverträglichkeit zu überprüfen. Durch eine entsprechende Verordnung ist sicherzustellen, daß die FKW, die derzeit als Alt-

stoffe nach dem Chemikaliengesetz geführt werden, einer Überprüfung im Sinne von Neustoffen unterzogen werden.

Abweichende Regelungen sind nur in begründeten und zu beantragenden Ausnahmefällen möglich. Sie sind zeitlich zu befristen und ggf. jährlich neu zu beantragen und zu begründen. Für die Erteilung von Ausnahmegenehmigungen ist eine unabhängige Kommission einzusetzen, die paritätisch mit VertreterInnen aus Fachbehörden, Umweltverbänden und Industrie zu besetzen ist.

Die Arbeit der Enquete-Kommission zur FCKW-Problematik und zu den Ersatzstoffen deckte im Hinblick auf die Reglementierung von Stoffen und Produkten erhebliche Lücken und Mängel auf.

Die Daten über umweltrelevante Stoffe, die notwendig sind, um über vorsorgende und nachsorgende Maßnahmen zu entscheiden, sind unzulänglich, sowohl was das prinzipielle Vorhandensein von Daten betrifft als auch die Verfügbarkeit der Daten für Administration und Öffentlichkeit. Daher sollte bei der anstehenden Novellierung des EG-Chemikaliengesetzes bzw. der anschließenden erneuten Novellierung des deutschen Chemikaliengesetzes ein § 1a neu eingefügt werden, der die nachstehenden stoffbezogenen materiellen Grundpflichten festschreibt:

- die Pflicht, Gefahren zu verhindern,
- die Pflicht, Vorsorge zu treffen,
- die Pflicht, über die Wirkungen des Stoffes, seine Anwendungsbereiche, Anwendungsmengen und Entsorgungsmöglichkeiten Daten zu erheben und mitzuteilen.

Für alte und neue Stoffe muß ein chemiepolitisch relevanter Datensatz erstellt werden, der u. a. genaue Daten zur Produktion, zur Anwendung, zur Entsorgung, zu Vermeidungs- und Rückhaltetechnologien sowie zu den jeweiligen Ersatzstoffen bzw. Produkten enthält.

Die Zusammenstellung hat EDV-gestützt zu erfolgen und soll von den Bürgern, Verbänden und der interessierten Öffentlichkeit nicht nur in schriftlicher Form, sondern auch mittels Datenträgern abgefragt werden können. Schützenswerte Geheimnisse können dabei gemäß § 22 Abs. 2 gesperrt werden.

Ozonabbau und Treibhauseffekt, die von den voll- bzw. teilhalogenierten FCKW sowie weiteren Verbindungen bewirkt werden, sind nur ein Belastungspfad, der auf die Chlorchemie zurückzuführen ist. Andere Gefährdungen bestehen in toxischer oder krebsauslösender Wirkung. Da die verschiedenen Chlorverbindungen über Verbundproduktion und daher nicht unabhängig voneinander hergestellt werden, gestaltet sich der Ausstieg aus nur einer Stoffgruppe problematisch; denn es können damit die Weichen gestellt werden für neue Produktionszweige mit neuen gefährlichen Stoffen.

Ein Rückzug aus der Chlorchemie ist daher sowohl aus toxikologischen als auch aus ökotoxikologischen Gründen unbedingt erforderlich. So wie sich die Chlorchemie ursprünglich in Abhängigkeit von der Natronlauge-Produktion entwickelt hat, wird der

Rückzug aus der Chlorchemie nicht unabhängig von anderen Produktionszweigen innerhalb der Chemie erfolgen. Daher kann der Rückzug aus der Chlorchemie nur ein Teilaspekt einer umweltverträglichen Chemiepolitik sein. Um künftige Fehlentwicklungen zu vermeiden, sind der Einführung von Basischemikalien, Materialien und Produkten vergleichende Produktlinienanalysen voranzustellen. Für bereits existierende Stoffe und Produkte ist dies nachträglich durchzuführen. Eine „sanfte“ Chemiepolitik muß zusätzlich auf einen möglichst geringen Energieeinsatz ausgerichtet sein.

## V. Klimaschutz durch Maßnahmen in Land- und Forstwirtschaft

### A. Landwirtschaft

Die moderne, industrialisierte Landwirtschaft und Viehhaltung trägt mit rund 15 % so erheblich zum anthropogenen Treibhauseffekt bei, daß auch hier unverzüglich gehandelt werden muß. Ein beschleunigter Übergang zur ökologischen Landwirtschaft und der Ausstieg aus der Massentierhaltung können dazu beitragen, schon bis 2005 in diesem Sektor die Klimagefährdungen (v.a. durch CO<sub>2</sub>-Emissionen aus dem Energiebedarf der Landwirtschaft, N<sub>2</sub>O-Emissionen aus dem Kunstdüngereinsatz und CH<sub>4</sub>-Emissionen aus der Rinderhaltung) deutlich zu verringern. Zur Förderung der ökologischen Landbewirtschaftung auf nationaler wie EG-Ebene sind umgehend insbesondere folgende Maßnahmen zu ergreifen:

1. Eine flächendeckende ökologische Intensivierung der Landbewirtschaftung ist zu unterstützen und fördern (vgl. BT-Drucksache 11/913) durch
  - a) Maßnahmen zum Verzicht auf die Anwendung ertragssteigernder Agrochemikalien, insbesondere von chemischen Halmverkürzern und Wachstumsregulatoren, sowie Maßnahmen zur Förderung des Verzichts auf weitere ertragssteigernde Chemikalien,
  - b) Besteuerung mineralischer Stickstoffdüngemittel zur Verteuerung von Rein-Stickstoff um 100 % (mit bestimmten Ausnahmen),
  - c) Ersatz der im Flächenstillegungsprogramm vorgesehenen Rotationsgrünbrache bzw. Dauerbrache (ohne Futternutzung) durch die Unterstützung von Leguminosengrünbrachenutzung.
2. Die Massentierhaltung ist zu begrenzen und eine artgerechte Tierhaltung ist zu unterstützen durch Einführung absoluter und flächengebundener Bestandsobergrenzen in der Tierhaltung (vgl. BT-Drucksache 11/1986), die sich an den Erfordernissen einer ökologisch verträglichen flächengebundenen landwirtschaftlichen Produktion orientieren. Als absolute Obergrenze des Viehbestandes wird ein Tierbestand von 100 Vieheinheiten pro Betrieb und von 2,5 Großvieheinheiten pro Hektar landwirtschaftlicher Nutzfläche angesehen.
3. Für Futtermittel ist die Beimischung von mindestens 50 % in der EG erzeugten Getreides vorzu-

schreiben, um u. a. die Einfuhr tropenwaldschädigender Futtermittel zu vermindern (vgl. BT-Drucksache 11/580).

4. Es sind gestaffelte Erzeugerpreise mit höheren Preisen für Grundmengen der Produktion pro Betrieb einzuführen zur Sicherung und Verbesserung der Einkommen der (weniger chemieintensiv wirtschaftenden) kleineren und mittleren Betriebe, die durch ihre vielseitige Betriebsstruktur umweltgerechter wirtschaften und die besten Voraussetzungen für eine Umstellung auf ökologische Bewirtschaftung haben (vgl. BT-Drucksache 11/913 und BT-Drucksache 11/1986).

## B. Forstwirtschaft

Der Forstwirtschaft kommt insofern eine Bedeutung im Klimaschutz zu, als sie den in der Biomasse gebundenen Kohlenstoff stabilisieren bzw. erhöhen kann. Eine höhere Kohlenstoffbindung in der Forstwirtschaft wird in der Regel erreicht:

- durch Übergang von der Kahlschlagwirtschaft mit gleichaltrigen Beständen zu ungleichaltrigen, naturnäheren Beständen, weil hier der Humusabbau auf Kahlfächen vermieden wird und die massearmen Kulturflächen entfallen,
- durch Verlängerung der Umtriebszeit in der Kahlschlagwirtschaft, weil bei Erhöhung des mittleren Alters einer Betriebsklasse bzw. eines Waldgebietes sich der Anteil der massearmen Kulturen und Jungbestände verringert.

Eine Steigerung des geernteten Holzzuwachses spielt nur dann eine größere Rolle, wenn die daraus gefertigten Produkte wie Bauholz eine längere Gebrauchsdauer als das mittlere Alter der Bestände haben oder sie als Ersatz für fossile Brennstoffe verwendet werden und die für Anbau, Ernte, Transport und Endeinsatz aufgewendete Energie wesentlich niedriger als die eingesparte Energie ist. Dieser Zusammenhang begründet neben anderen ökologischen Bedenken die Ablehnung des chemisch forcierten Anbaus nachwachsender Rohstoffe.

Deshalb ist es erforderlich,

1. das Bundeswaldgesetz zu novellieren und den Klimaschutz als integrales Ziel der Forstwirtschaft festzulegen,
2. die Länderforstverwaltungen auf die Einführung naturnäherer Wirtschaftssysteme und den Aufbau massereicher Bestände zu verpflichten und auch die personellen und anderen infrastrukturellen Voraussetzungen dafür zu schaffen, und
3. ein Umwelthaftungs- und Umweltschadensrecht einzuführen, um die unzumutbaren Belastungen der Wälder und der Waldbesitzer abzufangen.

## VI. Schutz der tropischen Wälder und ihrer Klimafunktionen

Hierzu hat der Unterzeichner gemeinsam mit anderen Kommissionsmitgliedern im zweiten Bericht der En-

quete-Kommission in einem Minderheitenvotum (vgl. BT-Drs. 11/7220) ausführliche Empfehlungen abgegeben, die hiermit bestätigt werden. Ziel dieses Maßnahmenkonzeptes ist es, mittelfristig zunächst die Zerstörung der Primärregenwälder und dann die Tropenwaldzerstörung insgesamt zu stoppen. Diese Ziele sollen mit einer derart forcierten Unterstützung durch die Industrieländer verfolgt werden, daß bis zur Jahrtausendwende mit einer drastischen Verringerung der Emission klimawirksamer Spurengase aus diesem Bereich gerechnet werden kann. Ein Erfolg bei diesen Bemühungen würde es wesentlich erleichtern, die in Toronto 1988 formulierten Reduktionsziele zu erreichen.

Die Eckpfeiler des Minderheitenvotums sind die Einrichtung eines großzügig ausgestatteten Tropenwaldfonds v. a. für den Verzicht auf Nutzung und weitere Erschließung der Tropenwälder, ein Moratorium für den Tropenforstwirtschafts-Aktionsplan, die Unterstützung des Selbstbestimmungsrechts für Stammesvölker und drastische Einschränkungen des Welttropenholzhandels. Im weiteren werden tiefgreifende Anpassungen der Weltwirtschaft an die Erfordernisse von Umweltschutz und Entwicklung gefordert. Diese Veränderungen wichtiger Rahmenbedingungen sind auch eine wichtige Voraussetzung für Klimaschutzmaßnahmen in den Ländern der Dritten Welt. So sind nach wie vor eine internationale Schuldenkonferenz, ein weitestreichender Schuldenerlaß und politische Einflußmöglichkeiten auf die transnationalen Konzerne notwendig. Maßnahmen zur Verbesserung der Marktposition der Dritten Welt und insbesondere für ihre Fertig- und Halbfertigerzeugnisse könnten außerdem durch eine erhöhte Wertschöpfung den Druck auf die Naturressourcen dieser Länder verringern. Erforderlich ist insbesondere auch eine ökologische und soziale Reform des Welthandelsabkommens (GATT), damit dies nicht weiter von den Industrieländern gegen die Interessen der Dritten Welt und auf Kosten der natürlichen Ressourcen instrumentalisiert werden kann.

## VII. Internationale Zusammenarbeit und Koordinierung der Maßnahmen zum Schutz von Klima und Erdatmosphäre

Die Bundesregierung soll nach den gemeinsamen Empfehlungen der Enquete-Kommission Anstrengungen zur weltweiten Zusammenarbeit und Koordinierung fördern und unterstützen. Dabei erscheint es geboten, für die Länder der Dritten Welt durch die Einrichtung eines internationalen Klima-Fonds (in den die Industrieländer etwa ein Prozent ihres Brutto-sozialproduktes einzahlen sollen), eines Tropenwald-Fonds (der mit jährlich rund 20 Mrd. DM auszustatten ist, (vgl. auch Minderheitenvotum in BT-Drucksache 11/7220) und durch den Transfer umwelt- und sozialverträglicher Technologien eine massive Unterstützung zu geben.

In einer internationalen Konvention sollen sowohl die Reduktionspflichten für klimawirksame Schadstoffe als auch eine weltweite Regulierung des Energieangebots und eine Kompensationslösung vereinbart werden. Die Industrieländer und insbesondere die

EG-Mitgliedsländer sollen durch ihre Reduktionsleistungen und durch ihre wirtschaftlichen Leistungen an ärmere Länder dafür eintreten, daß die Reduktionsziele der Klimakonferenz von Toronto (20 % CO<sub>2</sub>-Minderung gegenüber 1987 global bis 2005) erreicht werden können.

Für den Schutz der Wälder ist entweder eine internationale Wälderkonvention anzustreben oder eine besondere Regelung innerhalb einer Klimakonvention. Der Schutz der Tropenwälder kann Gegenstand eines Protokolls einer Klimakonvention oder einer internationalen Wälderkonvention sein, nicht aber Gegenstand einer eigenen Konvention. Eine Verbindung von Maßnahmen im Energie-, Verkehrs- und Wälderssektor unter dem Dach einer einzigen Klimakonvention hat wahrscheinlich insbesondere Vorteile, daß sie die Bereitschaft der Länder der Dritten Welt zur Beteiligung erhöht. Außerdem scheint es ökonomisch vorteilhaft zu sein, für den erforderlichen Lastenausgleich zwischen Nord und Süd einheitliche finanzielle Mechanismen zu schaffen, die Klimaschutzabgaben der Industrieländer etwa auch für den Schutz der Tropenwälder bereitstellen.

Abschließend soll ausdrücklich die Forderung nach Einrichtung eines Weltökologierates im Rahmen der Vereinten Nationen, an dem alle Ländergruppen beteiligt sind, unterstützt werden.

### VIII. Abrüstung und Schutz der Erdatmosphäre

Als Empfehlung für die zukünftige Arbeit der Enquete-Kommission ist u. a. die Untersuchung der Wechselwirkungen Klima – internationale Sicherheit ausgesprochen worden. Hier wird die Problematik wegen ihrer Dringlichkeit bereits in Umrissen skizziert und es werden Empfehlungen ausgesprochen.

Der Einfluß von Militär und Rüstung auf das Klima ist ein wichtiges, bisher völlig verdrängtes oder verschwiegenes Problem. Es wurde weder von seiten des Militärs noch der Umweltschützer zur öffentlichen Sache gemacht. Dabei steht spätestens seit den Tutzing-Friedens-Tagen im September 1989 die Verknüpfung von Umweltzerstörung und Militär als Defizit in der öffentlichen Betrachtung bzw. als Bringschuld von Wissenschaft und Politik fest. Wissenschaftler bezeichnen die Eingriffe des Menschen in das Klima als „großes Experiment“, das wegen der völlig ungeklärten Folgen bei einer Umweltverträglichkeitsprüfung niemals genehmigt werden könnte. Die Militärs sind an diesem Experiment in erheblichem Umfang beteiligt.

Die Enquete-Kommission „Vorsorge zum Schutz der Erdatmosphäre“ hat sich mit diesem Thema nicht befaßt, sieht hier jedoch Klärungsbedarf.

Hierzu gehören folgende Fragen:

1. Welche Versuche zur Wetterbeeinflussung oder Änderung der Ionosphäre wurden seitens der Militärs bisher durchgeführt und welche Ergebnisse wurden erzielt?
2. Welche Folgen haben Luft- und Raumfahrt in besonders sensiblen höheren Bereichen der Atmo-

sphäre, insbesondere angesichts der Tatsache, daß die Verbrennungsprodukte der Treibstoffe und eingesetzten Additive z. T. ozonzerstörende Eigenschaften haben und somit zur Ausdünnung der Ozonschicht beitragen?

3. In welchem Umfang wurde Umweltvernichtung als Mittel in kriegerischen Auseinandersetzungen, z. B. bei Waldvernichtung durch Herbizideinsatz, eingesetzt. Und welche Planungen bestehen hier?
4. In welchen Fällen können durch militärische Aktivitäten schwerwiegende Klimaänderungen ausgelöst werden (der „nukleare Winter“ tritt auch bei einem Atomkrieg „aus Versehen“ ein, Atombombenunfälle oder Flugzeugabstürze auf Chemiewerke hätten verheerende Folgen)?
5. In welchem Umfang verbraucht die weltweite Bereitstellung der „militärischen Sicherheit“ große Mengen an monetären, intellektuellen und natürlichen Ressourcen, die dringend zum Klimaschutz und damit für die „Internationale Ökologische Sicherheit“ benötigt werden?
6. Welchen Beitrag zur Klimaschädigung leisten die Bereitstellung der Ausrüstung und der Betrieb des Militärapparates durch die Abgase der dabei verbrauchten Energie oder durch die im militärischen Bereich eingesetzten FCKW und Halone?
7. In welcher Weise kann die Notwendigkeit des Schutzes der Erdatmosphäre konkrete Abrüstungsschritte beschleunigen?

### Schlußbemerkung

Auch die hier vorgeschlagenen Maßnahmen in verschiedenen Bereichen der Wirtschaft und Gesellschaft reichen eventuell nicht aus, die gesteckten Ziele zu erreichen, wenn die Einsicht in die Notwendigkeit des Schutzes der Erdatmosphäre nicht zu einem Bewußtseinswandel der Gesellschaft führt, durch den der Schutz der natürlichen Lebensgrundlagen einen bestimmenden Einfluß auf die täglichen Entscheidungen des täglichen Lebens nimmt. Die Herausforderung ist so groß, daß sie nur bei gleichzeitigen Maßnahmen für den Umweltschutz und der Herstellung sozialer Gerechtigkeit zwischen Nord und Süd bewältigt werden kann.

### Zusatzvotum der Kommissionsmitglieder Prof. Dr. Henicke und Prof. Dr. Bach zu Abschnitt E „Nationales Vorgehen zur Reduktion energiebedingter klimarelevanter Spurengase“

#### Weitergehende Maßnahmen im Bereich Energie und FCKW

##### I. Der ökologische „Umbau“ des Energiesektors

Vor allem über eine Reform der Ordnung und Struktur der leitungsgelagerten Energiewirtschaft muß angesichts der möglichen katastrophalen Auswirkungen des anthropogenen Treibhauseffekts, wegen der geo-

politischen Konflikte um die Öl- und Gasressourcen sowie wegen der Risiken der Atomenergie neu nachgedacht werden.

Die erfolgreiche Umsetzung einer Klimastabilisierungspolitik ist ohne „Umbau“ zumindest des Energie- und Verkehrssystems nicht möglich. Ob überhaupt und mit welchen Instrumenten ein derartiger „Umbau“ innerhalb einer profit- und marktgesteuerten Wirtschaft erreicht werden kann, ist bisher zu wenig systematisch untersucht worden. Hier besteht erheblicher Untersuchungsbedarf.

Für eine erfolgversprechende Klimastabilisierungspolitik muß das Verhältnis zwischen Staat und Energie monopolen durch eine demokratisierte und kompetentere öffentliche Aufsicht sowie durch eine effektive gesamtwirtschaftlich orientierte Planung und Regulierung grundlegend verändert werden. Notwendig sind umfassende Maßnahmen- und Instrumentenbündel, die strukturelle Reformen der Eigentumsordnung, Ge- und Verbote, die Neuorientierung der Unternehmensziele von EVU und die umfassende Neugestaltung der staatlichen Aufsicht ebenso einschließen wie „marktförmige“ Abgaben-, Förder- und Anreizsysteme.

Eine CO<sub>2</sub>-Reduktionspolitik kann als qualitatives Wachstum in dem Sinne bezeichnet werden, daß kohlenstoffintensive Energieträgermärkte und Unternehmensbereiche absolut schrumpfen müssen, während die Produktion und der Einsatz CO<sub>2</sub>-mindernder Technologien beträchtlich zunehmen wird. Hinzu kommen mögliche Änderungen im Verhalten und im Lebensstil. Da diese Umstrukturierung alle produktiven wie konsumptiven Bereiche einer Gesellschaft betrifft, bedeutet der „Umbau“ zu einem klimaverträglichen und risikominimierenden Energiesystem auch weit mehr als einzelne schädliche Produkte oder Produktgruppen (wie z. B. die FCKW) aus dem Markt zu nehmen und durch Ersatzstoffe zu ersetzen.

Soll eine derart umfassende stoffliche Umstrukturierung – innerhalb der derzeitigen Wirtschaftsordnung – ohne ökonomische Krise ablaufen, müssen die bisherigen Anbieter kohlenstoffhaltiger Produkte in andere Produktionszweige diversifizieren und/oder in die Ersatztechnologien mit entsprechender Profitrate investieren können; letztere Substitutionsstrategie ist vergleichbar mit der derzeit stattfindenden Umstellung der FCKW-Produzenten auf die Herstellung profitabler Ersatzstoffe. Das weltweite Verbot von FCKW schafft im Prinzip *uno actu* für die gleichen Produzenten einen lukrativen Ersatzmarkt.

Anders bei einer Klimastabilisierungspolitik. Es ist eher unwahrscheinlich, daß die bisherigen hochkonzentrierten Monopolisten und Weiterverkäufer kohlenstoffhaltiger Energieträger auch die effizientesten Anbieter und Anwender von CO<sub>2</sub>-Vermeidungstechnologien sein werden; dezentralere Akteure – kommunale EVU, die Industrie, die Verbraucher selbst – sind hierzu weit besser geeignet. Daher muß auch die Grundsatzdebatte über eine adäquate Reform und Ordnung der Energiepolitik im Lichte einer Klimastabilisierungspolitik weitergeführt und zu einem raschen Ergebnis gebracht werden.

Die Dringlichkeit einer Klimastabilisierungspolitik macht es notwendig, den Zeitrahmen und die Eingriffstiefe einer Umsetzungsstrategie für einen ökologischen Umbau der Energiewirtschaft genauer zu diskutieren. Hierfür werden als Alternative zum bestehenden Ordnungsrahmen der leitungsgelassenen Energiewirtschaft zwei neue ordnungspolitische Konzepte vorgeschlagen:

1. Der eine Weg ist der langwierige Prozeß einer strukturkonformen Regulierung der Energiewirtschaft ohne direkte ordnungspolitische Eingriffe in die bestehende Eigentums- und Versorgungsstruktur der EVU und in deren Investitions- und Unternehmensautonomie. Für diesen Weg ist die Ablösung des Energiewirtschaftsgesetzes (EnWG) durch ein „Energiespargesetz“ notwendig, das vor allem eine vollständig neue Zielsetzung (orientiert am Konzept der Energiedienstleistung) sowie eine umfassende Prüfkompetenz und gestärkte Umsetzungsautorität der staatlichen Energiefachaufsicht regeln müßte. Zusätzlich müßte das veraltete „Energieeinsparungsgesetz“ (EnEG von 1976) und die hierauf aufbauenden Verordnungen im Sinne einer forcierten Energieeinsparpolitik verschärft werden. In diese Richtung geht der vorliegende Gesetzentwurf der SPD für ein neues „Energiegesetz“ (vgl. BT-Drucksache 11/7322). Inwieweit dieser langwierige Weg tatsächlich einen Umbau der Energiewirtschaft bewirkt und dem begrenzten Zeitrahmen einer CO<sub>2</sub>-Reduktionspolitik entspricht, wäre zu untersuchen.
2. Ein direkterer Weg führt über eine Verstaatlichung und anschließende Entflechtung, Dekonzentration und weitgehende Kommunalisierung der großen Monopole der leitungsgelassenen Energiewirtschaft; günstige Voraussetzungen hierfür bestünden bei einer entsprechenden Neuordnung der Energiewirtschaft in der ehemaligen DDR. Dieser Weg setzt vor allem eine handlungsfähige Regierungsmehrheit und politische Entschlossenheit voraus. Das EnWG müßte durch ein „Energiespar- und strukturgesetz“ abgelöst werden, das zusätzlich zu den unter 1. genannten Eckpunkten die Neuordnung der Eigentumsverhältnisse und deren Übergang auf die neuen (vor allem kommunalen) Eigentümer regelt. In diese Richtung geht eine von der Bundestagsfraktion DIE GRÜNEN (BT-Drucksache 11/6484) vorgelegte Aktualisierung ihres Re-kommunalisierungsantrages vom 6. 2. 1986. Ob und wie die zu erwartenden politischen Widerstände gegen eine solche Strukturreform überwunden werden können, wäre zu diskutieren.

Beide ordnungspolitischen Wege können und müssen – auch zum Abbau der bestehenden Innovationsblockade – mit einem durch ein besonderes Gesetz zu regelnden Ausstieg aus der Atomenergie verbunden werden.

Entscheidend ist letztlich, welcher Zeitrahmen für die Eindämmung der sich kumulierenden Risiken und Krisen des Energiesystems als noch akzeptabel angesehen wird, und wie entschlossen die Politik ihr Primat gegenüber der Ökonomie durchzusetzen gewillt ist.

Als Konkretisierung des oben genannten „direkteren Weges“ werden im folgenden einige Eckpunkte für

die Neuordnung der Energiewirtschaft wie auch für einen neuen gesetzlichen Handlungsrahmen zusammengefaßt:

## II. Zielstruktur einer sozial-, umwelt- und klimaverträglichen Neuordnung der Energiewirtschaft

Das ÖKO-Institut hat sich in zahlreichen Publikationen zu einer Reform von Ordnung und Struktur der Energiewirtschaft geäußert (vgl. z. B. Hennicke u. a. 1986) und auch für die Bundestagsfraktion DIE GRÜNEN entsprechende Anträge an den Deutschen Bundestag mitformuliert (insbesondere: „Rekommunalisierung und Demokratisierung der Energieversorgung (Neuordnung der Energiewirtschaft und Novellierung des Energierechts)“, BT-Drucksache 11/6484 vom 14. 2. 1990). Auf diese Arbeiten wird hiermit verwiesen.

Kurz zusammengefaßt wird in diesen Neuordnungskonzepten eine Zielstruktur insbesondere für die leitungsgebundene Energieversorgung beschrieben, die auf den folgenden Eckpunkten basiert:

### – Die Kommune als Basiseinheit

Zum zentralen politischen Ort der Umwandlung und Nutzung von Energie werden die Städte, die Gemeinden und Kreise.

### – Wandel vom EVU zum EDU

Der Versorgungsauftrag bzw. der in den Gemeindeordnungen sogenannte öffentliche Zweck von EVU soll im Sinne von EDU ausdrücklich umorientiert und präzise festgelegt werden.

### – Die Primärenergiebasis

Die inländische Förderung und der Import von Primärenergie wird zur Durchsetzung des Leitziels „Vorrang für Energieeinsparung“ unter gesellschaftliche Kontrolle gestellt. Insbesondere die Primärenergiebasis der Stromerzeugung soll eigentumsmäßig von der Stromerzeugung entflochten werden.

### – Die Netze

Die örtlichen Netze werden kommunales Eigentum und von kommunalen EDU betrieben. Die Höchstspannungsnetze werden in das Eigentum von öffentlichen Zweckverbänden überführt und für jedermann nutzbar zu kostendeckenden Preisen zur Verfügung gestellt.

### – Die Kraftwerke

Die Kraftwerke werden in das Eigentum von Betreibergesellschaften übergeführt, die in der Regel von kommunalen bzw. auch gemischt-öffentlichen Unternehmen kontrolliert und betrieben werden. Alle Betreibergesellschaften arbeiten nach dem Kostendeckungsprinzip und kein Unternehmen betreibt mehrere Großkraftwerke. Dies schließt die Kooperation in regionalen und überregionalen Verbundsystemen ein.

### – Die (Energie-)Planungsräte

Auch in einer konsequent kommunalisierten und dezentralisierten Energiewirtschaft – vor allem während des Übergangsprozesses – besteht zur Umsetzung einer Klimastabilisierungspolitik ein überregionaler Planungs- und Koordinierungsbedarf. Diese Aufgabe sollen – in Ablösung der Deutschen Verbundgesellschaft (DVG) und ihrer privatwirtschaftlichen Koordinierungsfunktion – auf Bundes- und Länderebene demokratisch legitimierte (Energie)Planungsräte übernehmen.

### – Die Aufsicht

Neben der bürgerschaftlichen Kontrolle insbesondere durch die Gemeinderäte wird eine übergeordnete demokratisierte Aufsicht auf Landesebene institutionalisiert, die nach dem Vorbild einer Public Utility Commission in einigen Bundesstaaten der USA (wie z. B. in Kalifornien) aufgebaut sein könnte.

Durch Verabschiedung und den stufenweisen Vollzug des oben erwähnten „Energiespar- und strukturgesetzes“ müßte die bestehende Struktur der leitungsgebundenen Energieversorgung auf diese neue Zielstruktur übergeführt werden.

Von großer Bedeutung ist dabei, daß die Chance für eine Neuordnung der Energiewirtschaft mit dieser Zielrichtung in der DDR nicht verspielt wird. Dies wäre der Fall, wenn dort, wie derzeit beschlossen, die staatlichen Kombinate durch wenige gemischtwirtschaftliche Stromkonzerne aus der Bundesrepublik abgelöst würden. Der Vertrag vom 22. August 1990, der die Beherrschung der Elektrizitätswirtschaft in den fünf hinzukommenden Bundesländern durch west- und süddeutsche Großstromversorger regelt sowie auch entsprechende monopolverstärkende Verträge mit marktbeherrschenden Erdgaskonzernen aus der Bundesrepublik sind daher nach dem 3. Oktober mit allen rechtstaatlich zur Verfügung stehenden Mitteln schnellstmöglich aufzuheben.

## III. Kriterien und inhaltliche Eckpunkte eines „Energiespargesetzes“

Insbesondere beim (stufenweisen) Übergang auf die unter II. beschriebene neue Zielstruktur wie auch zu deren Weiterentwicklung und Vertiefung muß der bisherige energierechtliche Rahmen vollständig verändert werden. Im folgenden sollen entsprechende Kriterien und Eckpunkte konkreter zusammengefaßt werden:

### 1. Kriterien eines möglichst gefährdungsfreien, sozialverträglichen, preisgünstigen sowie umweltverträglichen Energiesystems

Das mit dem neuen Energiesetz anzustrebende Energiesystem sollte den folgenden umfassenden Kriterien genügen:

– Soziale Gerechtigkeit: Das Energiesystem soll die gesellschaftliche Situation für sozial schwächere Gruppen verbessern, d. h. die Energiekostenbela-

stung so gering wie möglich halten, Machtkonzentrationen im Energiesystem abbauen und die Mitwirkungsmöglichkeiten der Energienutzer bei Planung und Realisierung von Energieanlagen ermöglichen.

- **Schonung von Natur und Ressourcen:** Die Energieanlagen, die sowohl beim Bau als auch beim Betrieb am wenigsten in die Natur eingreifen und bei denen möglichst wenig erneuerbare Materialien (auch: Fläche und Wasser) sowie Energieträger verbraucht werden und die dadurch eine nachhaltige („sustainable“) Entwicklung ermöglichen, sind zu bevorzugen.
- **Klimaschutz:** Das Energiesystem darf die klimatischen Lebensbedingungen auf der Erde nicht gefährden; dies erfordert eine erhebliche Senkung der Emissionen von Kohlendioxid und anderer klimawirksamer Spurengase.
- **Wirtschaftlichkeit:** Energiedienstleistungen sollen möglichst preisgünstig, jedoch ohne Kostenexternalisierung angeboten werden; d. h. beim Bau und Betrieb von Energieanlagen darf die betriebswirtschaftliche Rentabilität nicht zu Lasten anderer Akteure, der Umwelt oder der Nachwelt durchgesetzt werden.
- **Sicherheit:** Das Energiesystem soll eine möglichst hohe Versorgungs-, Betriebs-, Unfall- und Krisensicherheit aufweisen. Durch eine fehlerfreundliche Technik ist zudem die mögliche Schadenshöhe zu begrenzen.
- **Politische Verträglichkeit und Zukunftsoffenheit:** Das Energiesystem soll für die Zukunft keine irreversiblen Sachzwänge erzeugen, durch Politik (auch von zukünftigen Generationen) revidierbar und steuerbar sein und nicht mit der Notwendigkeit von Polizeischutz und Personenkontrolle verbunden sein.
- **Internationale Verträglichkeit:** Das Energiesystem soll zur internationalen Entspannung beitragen, auch bei Mißbrauch keine militärischen Optionen eröffnen und keine Kosten auf andere Länder verlagern bzw. einseitige Vorteile eines Landes zu Lasten anderer Länder ermöglichen.

## 2. Gesetzliche Orientierung am Konzept der Energiedienstleistung (EDL)

Da der EDL-Begriff zwar immer mehr benutzt, aber zumeist noch sehr verschwommen definiert wird, verlangt die gesetzliche Orientierung am EDL-Konzept eine präzise Zweckbestimmung durch das neue Energiegesetz:

Das Gesetz bezweckt, die Bereitstellung von Energiedienstleistungen möglichst gefahrungsfrei, sozialverträglich, preisgünstig sowie unter Schonung der natürlichen Umwelt und der Ressourcen zu sichern.

Diese Hauptziele werden insbesondere durch sparsamen und rationellen Umgang mit nicht erneuerbaren Energieträgern und den Einsatz erneuerbarer Energiequellen verfolgt.

Die mittels Energieeinsatz zu befriedigenden Bedürfnisse sollen durch kombinierten Einsatz von Energie, Material, Arbeit und Wissen sowie mit einem möglichst geringen spezifischen Verbrauch an nicht erneuerbarer Primärenergie erbracht werden (Energiedienstleistungskonzept).

Die rationellere Energienutzung („Energiesparen“) ist die in ökologischer und volkswirtschaftlicher Hinsicht vorteilhafteste Form der „Beschaffung“ von Energie („Energiequelle“) und ist daher vorrangig zu erschließen.

Dies bedeutet insbesondere:

- a) Energieunternehmen sollen jeden Verkauf von Energie mit Beratungsangeboten und Maßnahmen zur rationelleren Energienutzung verbinden. Energieversorgungsunternehmen (EVU) sollen dadurch ihre Angebotspalette erweitern („Investitionen in NEGAWatt“) und ihre Unternehmensziele am neuen Leitziel eines Energiedienstleistungsunternehmens ausrichten Einführung des „Least-Cost-Planning“-Prinzips).
- b) Investitionsentscheidungen von Energieunternehmen sollen sich – wie in einigen Bundesländern in den USA gesetzlich vorgeschrieben – an dem Ziel orientieren, daß ein zusätzliches Angebot an elektrischer Energie bei gleicher einzel- und gesamtwirtschaftlicher Kosteneffektivität grundsätzlich zunächst durch Einsparmaßnahmen, dann durch erneuerbare Energiequellen, dann durch Anlagen der Kraft-Wärme-Koppelung und – nur in ganz besonderen Ausnahmefällen – durch Kondensationskraftwerke bereitgestellt wird.  
  
Wie z. B. in der Pacific Northwest Region der USA sollte ein standardisiertes Rechenverfahren für einen Kostenvergleich (Definition der Kosteneffektivität) für Zubau- und Einsparmaßnahmen festgelegt und in diesem Zusammenhang auch ein Kostenbonus für vermiedene externe Kosten bei Energiesparmaßnahmen und erneuerbare Energiequellen quantifiziert werden.
- c) Alle Prozesse zur Bereitstellung von Energiedienstleistungen sollen so geführt werden, daß möglichst wenig Energie eingesetzt wird (z. B. durch Wärmedämmung, Verminderung von Reibungsverlusten, energetisch optimierte Prozeßführung).
- d) Anlagen zur Umwandlung und Nutzung von Energie sollen einen möglichst hohen Nutzungsgrad bezogen auf die eingesetzte Primärenergie haben.
- e) Energiedienstleistung, die mit niederwertigen Energieformen (wie Abwärme und Umgebungswärme) erbracht werden können, sollen so wenig wie möglich und gesamtwirtschaftlich vertretbar mit hochwertigen Energieträgern erzeugt werden.
- f) Der Einsatz erneuerbarer Energiequellen hat soweit gesamtwirtschaftlich vertretbar Vorrang vor dem Ausbau der Versorgung mit nichterneuerbaren Energieträgern.
- g) Bei Neubauten sollen Stein- und Braunkohle sowie Erdgas grundsätzlich nur noch in Anlagen der



Kraft-Wärme-Koppelung und in umweltverträglichen Verfahren (z. B. Wirbelschicht; GuD-HKW), eingesetzt werden, derartige optimierte Kohle- und Gas-HKW und nicht die Atomenergie sind die für die Bundesrepublik und die DDR (sowie auch für viele andere Länder; vgl. das Votum Henricke/Bach) angemessenen Übergangstechnologien zur Sonnenenergie-Wirtschaft. Der zur Erfüllung der CO<sub>2</sub>-Reduktionsziele der Enquete-Kommission unumgängliche erhebliche Rückgang des Verbrauchs von Stein- und Braunkohle muß durch die Schaffung entsprechender Ersatzarbeitsplätze in den Kohlerevieren sozialverträglich gestaltet werden.

### 3. Grundlegende Rolle der Gemeinden und Gemeindeverbände

Den Gemeinden und Gemeindeverbänden soll die Pflicht und das Recht übertragen werden, eine öffentliche Versorgung über feste Leitungswege in ihrem Gebiet als Angelegenheit der örtlichen Gemeinschaft im Rahmen der gesetzlichen Grundsätze in eigener Verantwortung zu regeln. Eine Übertragung dieser Rechte und Pflichten auf Dritte soll möglich sein, jedoch von der Zustimmung durch die Aufsicht abhängig gemacht werden.

### 4. Planung als „Entdeckungsverfahren“

- a) Der in Punkt 2. geforderte komplexe Abwägungs- und Entscheidungsprozeß zwischen Maßnahmen der Angebotsausweitung und der rationelleren Energienutzung verlangt den Aufbau eines Informations- und Planungsinstrumentariums, wie es sich z. B. in den USA seit einigen Jahren bereits bewährt hat. Nur so können Energieunternehmen und Energieaufsicht Projektalternativen systematisch vergleichen und eine sachgerechte Auswahl der besten Variante vornehmen.
- b) Die Erstellung solcher Informations- und Planungsgrundlagen selbständigen, rechtlich unabhängigen Institutionen übertragen werden (z. B. „Energieplanungsräte“ nach dem Vorbild des „Northwest Power Planning Council“ in Oregon/USA), deren Auftrag, die Methodik der Planerstellung, die wissenschaftliche Personalkapazität, die Finanzierung und die Öffentlichkeitsbeteiligung bei der Planformulierung sollte durch das „Energiespargesetz“ geregelt werden.
- c) Die „Energieplanungsräte“ sollen an den Entscheidungen der Energieaufsicht beratend mitwirken und können Empfehlungen aussprechen. Zu diesem Zweck erstellen sie mittel- und langfristige Regionalpläne der leitungsgebundenen Energieversorgung und der technisch-wirtschaftlichen Einsparpotentiale sowie Aktions- und Umsetzungspläne mit ebenfalls nur empfehlendem Charakter.
- d) Zur örtlichen Konkretisierung dieses regional und bundesweit ausgerichteten Informations- und Planungssystem sollen Gemeinden oder Gemeindeverbände – anknüpfend an eine in vielen Städten

in der Bundesrepublik bereits bewährte Praxis – Energiekonzepte erstellen und umsetzen.

Die Energieaufsicht sollte die Erstellung von Energiekonzepten (bzw. CO<sub>2</sub>-Reduktionskonzepte) anordnen können. Energiekonzepte sollen speziellen qualitativen Anforderungen genügen. Eine Zusammenfassung von Energie- und Verkehrskonzepten zu kommunalen/regionalen CO<sub>2</sub>-Reduktionskonzepten ist zur Umsetzung der Reduktionsziele der Enquete-Kommission und unter Verzicht auf die Atomenergie anzustreben und zu fördern.

### 5. Neuregelung der Organisation und des Auftrags der Aufsicht

- a) Energieanlagen sollen der Energieaufsicht der Länder unterstehen (Vorbild: PUCs).
- b) Zur fachkompetenten und unabhängigen Durchführung der Aufsicht sollen die Aufsichtsbehörden einen wissenschaftlich qualifizierten Mitarbeiterstab erhalten. Dieser Stab ist aus einer Umlage auf alle Verkäufe von leitungsgebundener Energie zu finanzieren (ein Prozentsatz deutlich unter 1 % des Umsatzes würde ausreichen).
- c) Der Bau, die Erweiterung, die Erneuerung, die Stilllegung und unter besonderen Voraussetzungen auch der Weiterbetrieb von Energieanlagen sollen einer Genehmigungspflicht unterliegen. Im öffentlichen Genehmigungsverfahren hat der Betreiber für eine geplante Energieanlage unter Berücksichtigung aller sinnvollen Alternativen nachzuweisen, daß die Anlage der genannten Zwecksetzung (siehe III.2.) entspricht.
  - ca. Die Energieaufsicht kann gegenüber bestehenden Anlagen zur Durchsetzung der Ziele gem. III.2. Anordnungen treffen soweit diese wirtschaftlich zumutbar sind.
  - cb. Die Energieaufsicht kann den Weiterbetrieb von Anlagen untersagen, wenn der Betreiber einer Anordnung nach Ziff. ca. nicht Folge leistet  
oder  
wenn die Anlage den Vorschriften des neuen Gesetzes widerspricht und nicht in angemessener Zeit bzw. nicht mit zumutbarem wirtschaftlichem Aufwand den Vorschriften angepaßt werden kann.
- d) Die Energieaufsicht führt – vergleichbar den amerikanischen Public Utility Commissions (PUC) – eine Preis- und Gewinnkontrolle durch. Zumindest die Preise für Elektrizität und ihre Bestandteile bedürfen daher der Genehmigung durch die Energieaufsicht. In wieweit diese Genehmigungspflicht auf die Preise für Gas und Wärme sowie auf die Konditionen der stromwirtschaftlichen Kooperation (Einspeise-, Reserve- und Zusatzstrombedingungen) ausgedehnt werden soll, ist zu prüfen.
- e) Sofern eine angemessene Förderung aus öffentlichen Mitteln sichergestellt ist, sollte die Aufsicht gegenüber Energieunternehmen und Kommunen die Anordnung treffen können,

- daß Energie- bzw. CO<sub>2</sub>-Reduktionskonzepte) erstellt werden müssen, und
- daß Beratungs- und Fördermaßnahmen für rationellere Energienutzung durchgeführt werden.

## 6. Auskunfts- und Mitteilungspflicht

Im Vergleich z. B. zu amerikanischen EVU (rd. 75 % reine Privatunternehmen) ist die Transparenz der Geschäftspolitik der zumeist öffentlich gebundenen EVU in der Bundesrepublik gering.

Zumindest die Energieaufsicht und die Energieplanungsräte sollten daher von Betreibern von Energieanlagen jede Auskunft über ihre wirtschaftlichen und technischen Verhältnisse verlangen und diese Informationen auch an Dritte weitergeben können, soweit der Zweck des Energiespargesetzes es erfordert.

Die Energieaufsicht sollte darüber hinaus auch bestimmte technische und wirtschaftliche Vorgänge und Tatbestände bei Energieunternehmen generell mitteilungspflichtig machen können (z. B. die Investitionsplanung und die Erzeugerkosten als Entscheidungsgrundlage für potentielle Netzeinspeiser).

Unternehmen der öffentlichen Versorgung sollen verpflichtet werden, allgemeine Versorgungsbedingungen und Preise öffentlich bekanntzugeben. Dies gilt auch für alle industriellen Sondertarife, Einspeisebedingungen und die Bezugspreise von Weiterverteilern.

## 7. Ablösung der Bundestarifordnungen durch Energiepreisordnungen

Durch die derzeit gültige Bundestarifordnung Elektrizität (BTOElt) und die praktizierte Preisbildung für industrielle Sonderabnehmer werden insbesondere die stromintensive Industrie und nicht stromspezifische Anwendungsbereiche (z. B. Strom für den Wärmemarkt) systematisch auf Kosten der übrigen Verbraucher (bzw. Verbrauchsbereiche) und zu Lasten der Umwelt begünstigt. Gleichzeitig bewirken diese Preisstrukturen hohe volkswirtschaftliche Verluste, indem weiterhin Kapital vor allem in den Ausbau des Stromangebots anstatt in die Effizienzverbesserungen beim Stromeinsatz gelenkt wird. Eine kostenverursachungsgerechte Begründung für das Ausmaß der in der Bundesrepublik praktizierten Preisdifferenzierung zwischen Industrie-, Kleinverbrauchs- und Haushaltskunden bei den leistungsgebundenen Energieträgern ist für die Erzeugungskosten nicht ersichtlich und kann für die Transport- und Verteilungskosten durch eine entsprechende Differenzierung der Baukosten- und Anschlußkostenbeiträge erreicht werden.

In fast allen Bundesstaaten der USA wurden dagegen lineare Tarife genehmigt und in einigen Bundesstaaten der USA besteht kaum noch eine Differenz zwischen dem durchschnittlichen Strompreis, den ein Privathaushalt oder ein größerer Industriebetrieb zu zahlen hat.

Die Bundestarifordnung Elektrizität (BTOElt) soll daher durch eine Preisordnung Elektrizität (POElt) ersetzt werden, die für alle Verbrauchergruppen und Anwendungsformen von Elektrizität Geltung besitzt und sich an einem linearen, zeitvariablen Regeltarif orientiert. Entsprechende Preisordnungen für Gas und Wärme sollten geprüft werden (vgl. hierzu Antrag der Fraktion DIE GRÜNEN BT-Drucksache 11/2079).

## 8. Gesetzliche Einspeiseordnung

Zur Verbesserung der stromwirtschaftlichen Kooperation und zur aktiven Förderung von Systemen rationeller Elektrizitäts- und Wärmeerzeugung (Kraft-Wärme-Koppelung, Systeme auf Basis erneuerbarer Energiequellen) sollen die Einspeise-, Reserve- und Zusatzstrombedingungen für dezentrale Eigenerzeuger durch eine gesetzliche Einspeiseordnung geregelt werden (vgl. hierzu die oben genannte BT-Drucksache 11/2079).

## 9. Rationelle Energienutzung beim Verbraucher

- a) Das Energieeinspargesetz (EnWG) vom 22. Juni 1976 und die hierauf aufbauenden Verordnungen (WärmeschutzV; HeizAnIV; HeizBetrV) sollten nach folgenden Grundsätzen novelliert werden (vgl. hierzu auch Antrag der Fraktion DIE GRÜNEN in BT-Drucksache 11/2318 sowie Gesetzesentwurf der SPD-Fraktion in BT-Drucksache 11/7322);
  1. Umstellung des Anforderungskriteriums auf einen Maßstab der Energieeffizienz (Energiekennzahl)
  2. Anhebung des Anforderungsniveaus bei Neubauten entsprechend dem neuen (ab 1. 1. 1990) Schwedischen Standard für Niedrigenergie-Häuser
  3. Stufenweise Übertragung eines entsprechenden Anforderungsniveaus auf den Gebäudebestand
- b) Verbot des Neuanschlusses von Elektroheizungen über 2 KW; verbindlicher Mindest-Systemwirkungsgrad für neue Heizungssysteme (vgl. Antrag der Fraktion DIE GRÜNEN: BT-Drucksache 11/6727),
- c) Einführung von – nach dem Stand der Technik anpassungsfähigen – Verbrauchsnormen für energiesparende Geräte in Verbindung mit einer Kennzeichnungspflicht über Energieverbrauch und Energiekosten bei Haushaltsgeräten z. B. entsprechend dem „Energy Guide“ in den USA).

## 10. Novellierung des Kartellrechts zur Verbesserung der Bedingungen für rationelle und ressourcenschonende Energieversorgung

Ziel der Änderungen des GWB sollte sein,

- statt der Gemeinwohlformel des EnWG die oben genannten neuen Zielsetzungen des Energiegesetzes im GWB zu verankern,

- qualitative Aspekte der rationelleren Energieversorgung und -nutzung (EDL-Konzept) bei der kartellrechtlichen Aufsicht mit zu berücksichtigen und
- beim Leistungsvergleich zwischen Energieunternehmen (EDU) prinzipiell die volkswirtschaftliche Preisgünstigkeit der Bereitstellung von Energiedienstleistungen (unter Berücksichtigung der vermiedenen externen Kosten) statt der Marktpreise pro Energieinheit (Arbeit/Leistung) zugrunde zu legen.

Zur Intensivierung des Wettbewerbs um Versorgungsgebiete und zur Verstärkung der Rolle der Gemeinden (siehe III. 3) müssen die Gemeinden nicht nur das formelle Recht, sondern auch die ökonomische Möglichkeit erhalten, eine Energieversorgung nach den neuen Zielsetzungen des Energieeinspargesetzes (vgl. III.2.) in ihrem Gemeindegebiet aufzubauen oder zu übernehmen. Dies erfordert eine einheitliche Rahmenrichtlinie für die Praxis der Preisaufsicht zur Bewertung von Netzzrückkäufen und Anlagen (Orientierung am zeitanteiligen Restwert der Anschaffungskosten bezogen auf die technische Nutzungsdauer, vgl. Apfelstedt 1989).

#### **11. Änderung der Konzessionsabgabenordnung (KAE). Entflechtung der Gemeindefinanzen und der ÖPNV-Finanzierung von den Energieerlösen**

Neben der Änderung des Gemeindeverkehrsfinanzierungsgesetzes im Rahmen einer umfassenden Ausbauförderung für den ÖPNV muß durch die ohnehin anstehende Gemeindefinanzreform ein für die Kommunen aufkommensneutraler Ersatz für die Konzessionsabgaben gefunden werden, nur so kann die energieverbrauchsfördernde Wirkung und der strukturkonservierende Effekt (bei B-Gemeinden) des bisherigen KA-Systems – ohne Einnahmeverluste für die Kommunen – vermieden werden. Kurzfristig sollten Einnahmen aus KA zweckgebunden in einen Fonds zur Förderung der rationellen Energienutzung vor Ort eingezahlt werden.

#### **12. Änderung der Gemeindeordnungen**

Die Neubestimmung des „Versorgungsauftrages“ kommunaler EVU in Richtung auf die Unternehmensziele eines Energiedienstleistungsunternehmens (EDU) sollte unter Sicherung und Erweiterung der Substanz kommunaler EDU ergänzend zum „Gesetz zur rationellen Energienutzung“ durch die Novellierung der Gemeindeordnungen sichergestellt werden (vgl. Bremer Energiebeirat 1989).

### **13. Finanzierung und Förderungsprogramme**

#### **13.1 Primärenergieabgabe**

Erhebung einer Primärenergieabgabe auf Kohle, Erdgas und Öl zur zweckgebundenen Einzahlung in einen Energiespar und Umbaufonds, aus dem Anlagen und Maßnahmen zum Klimaschutz (z. B. für forcierte

rationellere Energienutzung sowie zur Markteinführung von Regenerativen) finanziert werden sollen.

Die Primärenergieabgabe sollte so bemessen und flexibel gestaltet sein, daß das Inlandspreisniveau für Primärenergie verstetigt, von kurzfristigen Ölpreisschwankungen abgekoppelt (wie teilweise in Dänemark) und an den langfristigen Trend eines klimastabilisierend bemessenen Weltölpreises angepaßt werden kann. Dadurch soll das Energiepreisniveau tendenziell die langfristigen Knappheitsrelationen widerspiegeln und zumindest teilweise die externen Kosten des Energieverbrauchs berücksichtigen; durch die Verstetigung würde gleichzeitig für Energiesparmaßnahmen eine verlässlichere Kalkulationsgrundlage geschaffen werden. Solange der Ausstieg aus der Kernenergie nicht vollzogen ist, soll die Atomenergie mit einer entsprechenden Atomstromsteuer belastet werden (vgl. Antrag der Fraktion DIE GRÜNEN: BT-Drucksache 11/3655).

#### **13.2 Novellierung des III. Verstromungsgesetzes**

Änderung des III. Verstromungsgesetzes nach folgenden Grundsätzen:

- Investitionszuschüsse für alle umweltfreundlichen Heizkraftwerke (HKW) sollen nur im Rahmen eines energiekonzeptorientierten Förderprogramms auf Länderebene vergeben werden.
- Bei der übrigen Förderung (Ausgleich der Mehrkosten der Kohle- gegenüber der Ölverstromung) soll der Ruhrkohlelistenpreis nur beim Einsatz in umweltfreundliche Heizkraftwerke direkt für die gesamte Einsatzmenge auf Importpreisniveau subventioniert werden. Diese Privilegierung von HKW gegenüber Kondensationsstromkraftwerken ist als Umweltbonus (indirekte Abwärmeabgabe für Kondensationskraftwerke) für die durch die Wärmeauskoppelung vermiedenen Emissionen zu verstehen.

#### **13.3 Förderprogramme des Bundes**

Als Förderprogramme des Bundes (entsprechende Landesprogramme sind zu formulieren) sollten beschlossen werden:

##### *a) ein Bundesrahmengesetz „Förderung der rationellen Energienutzung im kommunalen Bereich“*

Länder, die ein Förderprogramm mit vergleichbarer Zielsetzung wie das vorgeschlagene Energiespargesetz verabschieden, erhalten vom Bund einen Zuschuß in Höhe von 50 % des Fördervolumens. Dieses inhaltlich auf die Stärkung der kommunalen Energiewirtschaft zielende und – nach Möglichkeit – im Rahmen örtlicher Energie- bzw. CO<sub>2</sub>-Reduktionskonzepte zu vollziehende Programm sollte anstelle der Fortführung von Programmen nach dem „Gießkannenprinzip“ (wie z. B. ZIP I/II oder die Investitionszuschüsse nach dem III. Verstromungsgesetz) durchgeführt werden. Mittel aus dem Energiespar und Umbaufonds sollten zur Finanzierung verwendet werden.

Als Förderbereiche rationeller Energienutzung vor allem im kommunalen Bereich sollten z. B. festgelegt werden:

- Förderung von nutzungsorientierten kommunalen Energiekonzepten (CO<sub>2</sub>-Reduktionskonzepte);
- Förderung von Umsetzungsmaßnahmen zum Stromsparen; Zuschüsse für die Umstellung von Elektroheizungen und Elektroprozeßwärme (wo möglich und zweckmäßig) auf rationellere Energienutzungsformen;
- Förderung der Kraft-Wärme-Koppelung (z. B. durch Zuschüsse zum Bau von gasbetriebenen BHKWs und wirbelschicht-befeuerten Kohlekraftwerken);
- Förderung warmmietenneutraler Wärmedämmkonzepte in den Kommunen für Mietwohnungen (z. B. auch durch zweckgebundene Verwendung der Konzessionsabgaben); vorbildliche wärmetechnische Sanierung in landeseigenen Gebäuden;
- Förderung des Rückkaufs von Netzen und Anlagen für die Aufnahme der kommunalen Eigenversorgung in bisherigen B-Gemeinden;
- Förderung der forcierten Markteinführung regenerativer Energiequellen im kommunalen Bereich (z. B. Photovoltaik in Kombination mit hocheffizienter Gerätetechnik); beispielhafte Demonstrationsanlagen in kommunalen Gebäuden.

*b) Sonderprogramm zur Förderung der rationelleren Stromnutzung („Stromsparkonzepte“)*

Stromsparmaßnahmen (ohne Komfortverlust) sind zur Vermeidung unnötiger ökologischer und ökonomischer Belastungen (steigende langfristige Grenzkosten) sowie für den Ausstieg aus der Kernenergie und zur Reduktion der CO<sub>2</sub>-Emissionen nicht nur dringend notwendig, sondern auch, legt man vergleichbare Maßstäbe der Wirtschaftlichkeitsrechnung wie beim Neubau von Kraftwerken zugrunde, die wirtschaftlichste Form der Strombeschaffung („Stromsparen als Energiequelle“).

Insbesondere zur beschleunigten Umsetzung des vorhandenen beträchtlichen wirtschaftlichen, aber „gehemmten“ (ISI) Einsparpotentials bedarf es eines Sonderförderprogramms, durch das – möglichst zielgruppenorientiert und vollzogen auf der kommunalen Ebene – zum Beispiel

- Prämien für den Kauf marktbestener energiesparender Haushaltsgeräte;
- Zuschüsse bei der Umstellung von Elektroheizungen und elektrischen Warmwassergeräten auf ökologisch verträglichere Systeme (z. B. solare Warmwassererzeugung);
- Zuschüsse für die Entwicklung und Markteinführung von neuartigen Mehrfach-Zählern (z. B. zur Erfassung der Zeitzone bei zeitvariabler Tarifierung);
- Zuschüsse für ausgewählte stromsparende Maßnahmen im industriellen und gewerblichen Bereich z. B. Zuschüsse für Initialberatungen für Stromsparmaßnahmen);

- Prämien für EVU bei erfolgreicher Umsetzung von Stromsparprogrammen (orientiert an bestimmten Einsparquoten);
- Programme zur zielgruppenorientierten Einsparberatung und Verbraucherinformation

finanziert werden sollen.

*c) Sonderprogramm zur flächendeckenden Ausweitung der Energieberatung*

Mit Bundeszuschüssen soll ein verbandsübergreifendes Förderungsprogramm für eine flächendeckende Energiesparberatung für Kommunen und individuelle Verbraucher (unter Einbeziehung z. B. der Verbraucherzentralen) aufgelegt werden. Das Ausbaukonzept muß insbesondere auch die Ausbildung und Weiterbildung von Energieberatern und aller Berufsgruppen der Energie-, Heizungs- und Bautechnik (Einbeziehung des Bundesinstituts für Berufsbildung) in Fragen rationellerer Energienutzung verbessern (z. B. auch Ausbau der bestehenden und weitere Einrichtung von Modellstudiengängen mit dem Schwerpunkt rationelle Energietechnik/Energiewirtschaft neben Kassel, Berlin und Darmstadt, Aufnahme in die Ausbildungs- und Prüfungsordnungen entsprechender berufsqualifizierender Abschlüsse).

Aus ökologischen und sozialen Gründen ist darauf zu achten, daß insbesondere der Mietwohnungsbereich mit dem größten Einsparpotential, aber auch den meisten Hemmnissen von dieser Energieberatung erreicht wird.

*d) Förderung der Umschulung und der Produktkonversion*

Notwendig ist die Förderung von Umschulungs- und Sozialplänen für die Beschäftigten und die Förderung der Produktkonversion (unter aktiver Beteiligung und Mitbestimmung durch Betriebsräte bzw. Gewerkschaften) in allen von dem notwendigen Umbau negativ betroffenen Branchen (z. B. Atomindustrie; Kohlebergbau).

**14. Gründung von Landes-Energiedienstleistungsunternehmen („Energiesparagenturen“)**

Um die klimastabilisierenden Umbaumaßnahmen in der Energiewirtschaft auch regional wirksam zu bündeln, die knappen Finanzmittel möglichst effizient einzusetzen und das verfügbare personelle Know how zweckmäßig zu konzentrieren, bietet es sich an, Landes-Energiedienstleistungsunternehmen („Energiesparagenturen“) zu gründen bzw. den Unternehmenszweck und die Geschäftstätigkeit der bestehenden Landes-EVU grundsätzlich in diesem Sinne zu ändern. Zu prüfen ist auch, ob und wie bisherige Regional-EVU in solche Landes-EDU einbezogen bzw. durch Umwandlung ihres Unternehmenszwecks übergeführt werden können.

Unternehmenszweck eines solchen Landes-EDU ist die sparsame, rationelle, sozial- und umweltverträgliche sowie gesamtwirtschaftlich preiswürdige Bereitstellung von Energiedienstleistungen durch Bera-

tung, Vorprojektierung und die kommunale Energieplanung stärkende Finanzierungs-, Investitions- und Koordinierungsmaßnahmen zu fördern (Planungen zur Gründung einer „Hessen-Energie-GmbH“ mit entsprechender Zielsetzung gab es z. B. 1986/87 in Hessen).

### 15. FCKW: Chemiepolitische Forderungen

Die intensive Behandlung der FCKW-Problematik und der Ersatzstoffdiskussion hat erhebliche Lücken und Mängel in der Erfassung von Stoffströmen und in der Reglementierung von Stoffen und Produkten deutlich gemacht. Daher sind folgende Maßnahmen notwendig:

a) Die Datenlage zu vorsorgenden und nachsorgenden Entscheidungen über umweltrelevante Stoffe ist unbefriedigend, sowohl was das prinzipielle Vorhandensein von Daten betrifft als auch die Verfügbarkeit der Daten. Die Zurückhaltung relevanter (Produktions-)Daten in solch zentralen Fragen wie der Klimaproblematik behindert Parlament und Enquete-Kommission in ihrer Arbeit. Die Unterzeichner dieses Zusatzvotums empfehlen daher:

- Bei der anstehenden Novellierung des EG-Chemikalienrechts bzw. der dann folgenden erneuten Novellierung des deutschen Chemikaliengesetzes sollten folgende Regelungen aufgenommen werden:

In einem neu einzufügenden § 1 a sollten nachstehende stoffbezogene materielle Grundpflichten aufgenommen werden:

- die Pflicht, Gefahren zu verhindern
- die Pflicht, Vorsorge zu treffen
- die Pflicht, über die Wirkungen des Stoffes, seine Anwendungsbereiche, Anwendungsmengen und Entsorgungsmöglichkeiten Daten zu erheben und mitzuteilen.
- Für alte und neue Stoffe muß ein chemiepolitisch relevanter Datensatz erstellt werden, der transparent ist und alle umweltrelevanten Fragen beinhaltet.

Dieser Datensatz muß in einem gestuften, aber zeitlich festgelegten Verfahren von den Herstellern für die Behörden zusammengestellt werden. Die Festlegung des Verfahrens, die Prioritätensetzung und die zeitliche Befristung muß im Chemikaliengesetz festgelegt werden.

Die Zusammenstellung hat EDV-gestützt zu erfolgen, und soll von den Bürgern, Verbänden und der interessierten Öffentlichkeit nicht nur in schriftlicher Form, sondern auch mittels Datenträgern abgefragt werden können. Schützenswerte Geheimnisse können dabei gemäß § 22 Abs. 2 gesperrt werden.

b) Die Ersatzstoffe für die FCKW sind nicht ausreichend geprüft (vgl. FCKW-Bericht des Umwelt-

bundesamtes), einige bedeutende (öko-)toxikologische Untersuchungen (zum Beispiel über FKW) werden erst in den nächsten Jahren abgeschlossen werden.

Gemäß der Verordnungsermächtigung des gerade novellierten Chemikaliengesetzes sollte umgehend eine Verordnung verabschiedet werden, nach der von den Herstellern für alle FCKW-Ersatzstoffe die Daten wie für Neustoffe zusammenzustellen sind.

Dem Bundestag sollte über den Verlauf der Ersatzstoffzuführung und die jeweils neuen Erkenntnisse über die Ersatzstoffe von der Bundesregierung jährlich berichtet werden, zu damit verbundenen Anhörungen sind die beteiligten Kreise (inkl. der Umweltverbände) zu laden.

- c) Folgende Forschungsvorhaben sind zu vergeben:
- Erarbeitung der grundsätzlichen Anforderungen an einen chemiepolitisch relevanten Datensatz (mit Berücksichtigung Systemisierbarkeit, EDV-Träger etc.)
  - Bewertung der (öko-)toxikologischen Studien zu FCKW-Ersatzstoffen.
- d) Zur Bewertung grundsätzlicher chemiepolitischer Folgen wird die Einrichtung eines Chemie-Beirates empfohlen. Ziel eines solchen Gremiums ist die Beratung einer gemeinsamen Grundlage für die Konkretisierung einer umwelt- und gesundheitsverträglichen Chemiepolitik. Dem Gremium sollen gleichberechtigt neben Vertretern von Wirtschaft, Gewerkschaften, Staat und Wissenschaft auch Vertreter von Umwelt- und Verbraucherverbänden angehören.

### **Stellungnahme der Kommissionsmitglieder Müller (Düsseldorf), Frau Prof. Ganseforth, Frau Dr. Hartenstein und Dr. Kübler zu den Zusatzvoten des Kommissionsmitglieds Dr. Knabe und der Kommissionsmitglieder Prof. Dr. Bach und Prof. Dr. Hennicke zu Abschnitt E: „Nationales Vorgehen zur Reduktion energiebedingter klimarelevanter Spurengase“**

Die o. g. Kommissionsmitglieder geben zu den beiden Zusatzvoten zu Abschnitt E folgende Stellungnahme ab:

Aufgrund der Arbeitsfülle und des engen Zeitrahmens bestand leider keine Möglichkeit, die beiden Voten von Herrn Dr. Knabe sowie der Kollegen Prof. Dr. Bach und Prof. Dr. Hennicke in der Enquete-Kommission zu beraten. Nach unserer Auffassung ist es aber im Interesse eine qualifizierten und tragfähigen politischen Willensbildung unverzichtbar, über die vorgelegten Empfehlungen intensiv zu diskutieren. Das ist gerade ein wichtiges Ziel von Enquete-Kommissionen.

Das von den Kollegen Prof. Dr. Bach und Prof. Dr. Hennicke eingebrachte Zusatzvotum wird von den o. g. Kommissionsmitgliedern in vielen Forderungen

gen unterstützt. Wir sehen darin eine Grundlage für eine weitere Konkretisierung einer Klimaschutzpolitik, die bei der Fortsetzung der Arbeit der Enquete-Kommission in der nächsten Legislaturperiode, so wie dies von den Mitgliedern der Kommission empfohlen wird, weiter diskutiert werden sollte.

Das Votum des Kollegen Dr. Knabe MdB, eingebracht in der letzten Sitzung der Enquete-Kommission, umfaßt im wesentlichen eine Aneinanderreihung von Anträgen, die von ihm und seiner Fraktion in den letzten Jahren dem Deutschen Bundestag vorgelegt worden sind. Wir bezweifeln, ob ein derartiges, zwar legitimes, aber wenig diskussionsförderndes Verfahren, für die Arbeit einer Enquete-Kommission sinnvoll ist. Die o. g. Kommissionsmitglieder hätten durchaus auch die Möglichkeit gehabt, von der SPD-Bundestagsfraktion eingebrachte Bundestagsinitiativen, wie z. B. ‚Energiegesetz‘, ‚Kernenergieabwicklungsgesetz‘, ‚Programm: Energieeinsparung und rationelle Energieverwendung‘ oder ‚Forschungs- und Entwicklungsprogramm: Solarenergie und Wasserstofftechnik‘, zum Votum zu erheben. Doch ein solches Verfahren erscheint uns weder dem Thema angemessen, noch in der Lage, die dringend erforderliche Handlungsfähigkeit für eine Klimaschutzpolitik herzustellen.

**Ergänzendes Votum der  
Kommissionsmitglieder Prof. Dr. Hennicke  
und Müller (Düsseldorf), Prof. Dr. Bach,  
Frau Prof. Ganseforth, Frau Dr. Hartenstein,  
Dr. Knabe, Dr. Kübler**

## zur Energiewirtschaft in der DDR

### I. Vorbemerkung

Die Enquete-Kommission konnte, als die Studien zur Reduktion energiebedingter Klimagase in Auftrag gegeben wurden, die politische Entwicklung in Deutschland nach dem 9. November 1989 nicht absehen. Insofern war es nicht möglich, in den Energie-szenarien bereits eine gesamtdeutsche Bestandsaufnahme und Bewertung vorzunehmen. In der Enquete-Kommission besteht jedoch die Übereinstimmung, daß die Einbeziehung der ehemaligen DDR notwendig ist, wenn durch die Vereinigung der beiden deutschen Staaten die politischen und rechtlichen Voraussetzungen gegeben sind. Dies war erst mit dem Einigungsvertrag von September 1990 der Fall.

Allerdings werden erst seit einigen Wochen die notwendigen Energie- und Umweltdaten bekannt und erfaßt, so daß schon aus dem Grund keine ausreichend fundierte Aussage der Kommission insgesamt möglich gewesen wäre, zumal sie – trotz einer bereits sehr zeitaufwendigen Arbeitsweise – unter großem Zeitdruck gestanden hat. So war es ab dem Zeitpunkt, von dem an eine Vereinigung der beiden deutschen Staaten als wahrscheinlich unterstellt werden konnte, bis zur Fertigstellung des 3. Berichts nicht mehr möglich, eine auch nur annähernd so fundierte Aussage über die Möglichkeiten der Minderung klimawirksa-

mer Spurengase für die DDR zu machen wie für die Bundesrepublik. Hierzu ist ein vergleichbares Studienprogramm wie das für die Bundesrepublik durchgeführte notwendig. Zwar lassen sich einige der gewonnenen Erkenntnisse durchaus auch auf das Gebiet der ehemaligen DDR übertragen, dafür aber ist die Informationslage ungesichert, so daß für einzelne Bereiche erst einmal die Primärdaten erhoben werden müssen.

Wegen dieser ungeklärten Fragen und der Notwendigkeit, auch für die ehemalige DDR eine präzise Bestandsaufnahme vorzunehmen und Empfehlungen zu erarbeiten, hat die Enquete-Kommission einstimmig dem Deutschen Bundestag empfohlen, die Arbeit in der nächsten Legislaturperiode u. a. mit dem Schwerpunkt DDR fortzuführen. Deshalb wäre es nach Auffassung der o. g. Kommissionsmitglieder nicht sinnvoll, auf einer ungesicherten Grundlage quasi in letzter Minute noch verbindliche Empfehlungen der Kommission für eine Klimaschutzpolitik in der DDR abzugeben.

Wir bedauern, daß aus Zeitgründen keine entsprechenden Beratungen über eine Klimaschutzpolitik auf dem Gebiet der ehemaligen DDR in der Kommission stattgefunden haben. Problematisch sehen die o. g. Kommissionsmitglieder, daß in dem Zusatzvotum „Energie- und umweltpolitisches Programm einer vorsorgenden Politik zum Schutz der Erdatmosphäre in einem vereinten Deutschland“ der Anspruch erhoben wird: „Alle Aussagen beziehen sich auf das Vereinigte Deutschland“.

Die Kommission hat dieses kurzfristig eingegangene Votum nicht mehr diskutieren können. Dabei wird nicht das Recht von Kommissionsmitgliedern in Frage gestellt, Zusatzvoten abzugeben. Allerdings beziehen sich bis dahin auf Bewertungen und Empfehlungen zum Auftrag der Kommission, wie er im Einsetzungsbeschuß vom Deutschen Bundestag formuliert wurde, und auf die vorliegenden Studien und Berichte. Das war bei dem Votum zur DDR jedoch nicht der Fall.

Die o. g. Kommissionsmitglieder weisen insbesondere auf folgende kritische Punkte hin:

1. Angesichts der ungesicherten Datenbasis, ohne den Nachweis eines detaillierten Quellenstudiums der energiewirtschaftlichen Literatur und mangels eigener Untersuchungstätigkeit, kann der Anspruch im genannten Votum, ein „Energie- und umweltpolitisches Programm einer vorsorgenden Politik zum Schutz der Erdatmosphäre in einem Vereinten Deutschland“ vorzulegen, nicht eingelöst werden. Die für den Klimaschutz wichtige ‚Leitsubstanz‘ Kohlendioxid-Emissionen zum Beispiel mit einer groben Methode hochgeschätzt: Eine Senkung des Primärenergieverbrauchs um 1,5 bis 2 Prozent pro Jahr und eine Verringerung der Braunkohleförderung auf 160–180 Mio. Tonnen pro Jahr werden einfach vorausgesetzt. bei diesem so vorgegebenen Primärenergieverbrauch werden schematisch entsprechende Maßnahmen wie im Reduktionsszenario ‚Energiepolitik‘ angewandt, die jedoch nur „zur spezifischen Reduktion der CO<sub>2</sub>-Emissionen führen, die zwei Drittel der für

- das Bundesgebiet erwarteten Reduktionen ausmachen“ (ausgenommen Verkehr). Durch diesen angenommenen ‚Kunstgriff‘ „stehen als Eckwerte für das Gebiet der DDR lediglich Verbrauch und Emissionen insgesamt und für die Braunkohle fest. (!) . . . Mehr oder weniger willkürlich ist dagegen die Aufschlüsselung der übrigen Energieträger. Diese Aufgliederung soll nur eine plausible Energieversorgungsstruktur des Gebietes der DDR im Jahr 2005 widerspiegeln. Dies reicht aus für die weiteren Überlegungen.“ Wir melden unsere erheblichen Zweifel an: Für die beabsichtigte Ausgestaltung eines energie- und umweltpolitischen Programms für das ‚Vereinte Deutschland‘ sind auch hier systemare Betrachtungen notwendig.
2. Die durchaus informativen Abschnitte, die als Grundlage einer gemeinsamen Bestandsaufnahme hätten dienen können, werden leider an vielen Stellen mit unbegründeten und subjektiven Bewertungen verknüpft, von denen insbesondere folgende kritisch zu hinterfragen sind:
- 2.1 Von den Verfassern wird scheinbar selbstverständlich vorausgesetzt, daß jede in der ehemaligen DDR investierte DM zur Reduktion klimawirksamer Spurengase effizienter angelegt ist als in der Bundesrepublik. Dies ist in der Praxis keinesfalls so sicher wie dies hier behauptet wird. Zunächst gilt dieses Argument nur bei vollständiger regionaler Mobilität von Investitionskapital. Die Erschließung der Potentiale der rationellen Energienutzung, der kommunalen und industriellen Kraft-Wärme-Koppelung sowie der regenerativen Energieträger ist jedoch in vielen Fällen nur orts- und verbrauchergebunden möglich. Z. B. kommt für das größte Kohlendioxid-Minderungspotential — die energetische Sanierung des Gebäudebestandes — freie Kapitalmobilität in der Regel deshalb nicht in Frage, weil die überwiegende Zahl von Hauseigentümern gar nicht vor der Entscheidung steht, entweder auf dem Gebiet der Bundesrepublik oder der ehemaligen DDR zu investieren. Für den öffentlichen Großkraftwerksbereich (für den freie Kapitalmobilität theoretisch unterstellt werden kann) sind die rechtlichinstitutionelle Einbindung in eine versorgungswirtschaftliche Infrastruktur bzw. in ein Kraftwerks- und Verbundsystem und die erwartete Renditeentwicklung entscheidende und in der ehemaligen DDR noch in der Regel fehlende Investitionsvoraussetzungen. Im übrigen belegen die weiter unter aufgeführten Studien, daß derartige Investitionen in Großkraftwerke für den ökologischen Umbau der DDR-Energiewirtschaft allenfalls in Einzelfällen eine Rolle spielen können. Die theoretisch errechnete höhere Emissionsreduktion wird sich demnach in der Praxis keineswegs wie unterstellt erreichen.
- 2.2 Die unter 2.1 angeführte Aussage könnte dazu mißbraucht werden, das von der Enquete-Kommission geforderte Ziel einer Verringerung energiebedingter Spurengase um mindestens 30 Prozent bis zum Jahr 2005 für die Bundesrepublik dahingehend umzuwandeln, daß für die Bundesrepublik eine geringere Reduktionsquote für Kohlendioxid angesetzt wird, wenn im Gebiet der ehemaligen DDR, wo dies leichter erscheint, eine entsprechend höhere Quote erreicht wird. Dies widerspräche jedoch der Grundübereinstimmung der Kommission, dem zufolge das 30-Prozent-Ziel für die Bundesrepublik gelten soll, unbeschadet der Möglichkeit, in der ehemaligen DDR ein noch höheres Reduktionsziel durchsetzen zu können.
- 2.3 An mehreren Stellen wird ohne Begründung von einem angeblich „sich abzeichnenden Elektrizitätsnotstand in der DDR“ ausgegangen, was im übrigen auch den eigenen Annahmen hinsichtlich der Übertragbarkeit der Maßnahmen und Einsparpotentiale gemäß dem Reduktionsszenario ‚Energiepolitik‘ widerspricht. Damit wird der scheinbar unausweichliche Sachzwang konstruiert, nur die geballte Kapitalmacht weniger Großstromkonzerne könnte diesen ‚Notstand‘ abwenden. Daher erstaunt es nicht, daß der von allen Umweltverbänden übereinstimmende kritisierte Vertrag zwischen PreußenElektra, RWE-Energie und Bayernwerk und der DDR-Regierung sowie Treuhandstelle ohne Einschränkung begrüßt wird, ohne Rücksicht auf die damit erfolgte verhängnisvolle umwelt- und energiepolitischen, wettbewerbsrechtliche und ordnungspolitische Weichenstellungen.
- 2.4 Ohne nähere Begründung heißt es: „Zweifellos wäre ein sorgfältig geplanter Ausbau der Kernenergie, der die neusten Erkenntnisse der Reaktorsicherheit nützt, der wohl geeignetste Weg einer Neuorientierung der DDR-Energiewirtschaft mit den Zielen der Verbesserung der Versorgungssicherheit, der Kostenminimierung und der Reduktion der Schadstoff- und CO<sub>2</sub>-Emissionen.“ Ob bei den selbst unterstellten Annahmen ein derartiger Ausbau der Atomenergie schon vom Ansatz her bzw. hinsichtlich der Verbrauchsentwicklung überhaupt technisch noch möglich wäre, ist erst gar nicht untersucht worden.
3. Die o. g. Kommissionsmitglieder können hier nur beispielhaft das vorgenannte Votum hinterfragen. Eine vertiefende Aufarbeitung ist notwendig. Generell bedarf die Problemstellung weiterer intensiver Diskussion. Um die Bestimmung einer Klimaschutzpolitik für das Gebiet der ehemaligen DDR voranzubringen, nehmen die o. g. Kommissionsmitglieder auf ein Gutachten Bezug, das gemeinsam von ‚Öko-Institut, Freiburg/Darmstadt‘ und ‚Unabhängiges Institut für Umweltfragen, Berlin‘ im August 1990 vorgelegt wurde („Bestandsaufnahme und Perspektiven der Atom- und Energiewirtschaft in der DDR“). Dieses Gutachten wird hier auszugsweise wiedergegeben.
- Darüberhinaus wird empfohlen, die Arbeit der Forschungsstelle für Umweltpolitik (Lutz Mez et al, „Zur Energiesituation in der DDR“, Berlin 1990) sowie das ‚Zehn-Punkte-Programm für eine ökolo-

gisch verträgliche Energiepolitik im vereinten Deutschland' (Reinhard Weis et al, Bonn 1990) in die weitere Arbeit miteinzubeziehen.

## II. Zur Situation der Energieversorgung und Umweltbelastung in der DDR

### 1. Struktur- und Effizienz des Energiesystems der DDR

#### 1.1 Primärenergieeinsatz

Die DDR liegt im Primärenergieverbrauch je Einwohner in Europa an erster Stelle. In der Welt nimmt sie hinter Kanada und den USA den dritten Platz ein. Die unterschiedliche Einstufung der DDR im internationalen Vergleich hängt mit den angewandten Berech-

nungsverfahren zusammen. Derzeit sind zwei Verfahren üblich:

Verfahren A: Die in Wasser-, geothermischen, Wind- oder Atomkraftwerken erzeugte Elektroenergie wird mit dem Wärmeinhalt des elektrischen Stroms (3,6 MJ/kWh) auf die Primärenergie umgerechnet.

Verfahren B: Bei diesem Verfahren werden die Umwandlungsverluste bei der Stromerzeugung in konventionellen Kraftwerken berücksichtigt. Die erzeugte Elektroenergie wird mit dem durchschnittlichen spezifischen Brennstoffäquivalent des in den thermischen Kraftwerken erzeugten Stroms auf Primärenergie zurückgerechnet.

Spart man Länder mit sehr spezifischen Bedingungen (Bahrain, Qatar, Island etc.) aus den Betrachtungen aus, so ergibt sich unter den Industriestaaten folgende Einordnung des spezifischen Energieverbrauchs [UNO 1986]:

Tabelle 1

Primärenergieverbrauch pro Einwohner 1986

Land	Verfahren A		Verfahren B	
	[GJ/EW]	DDR = 100	[GJ/EW]	DDR = 100
Kanada .....	284	122	411	171
USA .....	278	119	308	128
DDR .....	233	100	240	100
Norwegen .....	194	83	394	164
CSFR .....	183	79	196	82
UdSSR .....	187	80	202	84
Belgien .....	163	70	198	83
BRD .....	166	71	186	78
Großbritannien .....	157	67	167	70
Dänemark .....	156	67	157	65
Schweden .....	143	61	302	126
Frankreich .....	114	49	162	68
Japan .....	106	45	124	52

Nach dem Verfahren A steht die DDR auf Platz drei der Rangordnung.

Wird der Primärenergieverbrauch nach Verfahren B berechnet, so haben Schweden und Norwegen aufgrund ihres hohen Wasserkraft- und Atomstromanteils einen noch höheren Primärenergieverbrauch pro Kopf der Bevölkerung. Berücksichtigt man die besonderen Bedingungen Norwegens und Schwedens, so ergibt sich für die DDR nach jedem der beiden Verfahren der dritthöchste spezifische Primärenergieverbrauch unter den Industriestaaten der Welt.

Die Ursachen für diesen überdurchschnittlich hohen Energieverbrauch sind in folgenden Punkten zu sehen:

1. Die Energiewirtschaft der DDR ist einseitig auf die Braunkohle als Hauptenergieträger orientiert. Damit verbunden sind hohe Energieaufwendungen für die Förderung, den Transport und die Umwandlung.
2. Veraltete und ineffektive Umwandlungsanlagen (Kraftwerke, Heizwerke, Verteilungsnetze etc.) arbeiten mit hohen Verlusten und führen zu schwerwiegenden ökologischen Belastungen.
3. Über weite Strecken werden veraltete und ineffektive Anwendungstechniken eingesetzt. So sind viele Produktionsanlagen, Geräte und Technologien veraltet; Meß-, Steuerungs-, und Regelungstechnik fehlen oft völlig oder sind nicht funktions-



fähig, die Wärmedämmung der Industrie- und Wohngebäude ist schlecht. Dieser Zustand ist einerseits eine Folge der Politik der Investminimierung in den letzten Jahren (siehe Abb. 1), andererseits war innerhalb der geplanten Wirtschaft die Beschaffung anderer Technologien sowohl für die Konsumenten als auch die Produzenten sehr schwer bzw. unmöglich.

4. Die Energieverschwendung wurde sowohl durch Subventionspolitik (Bevölkerung) als auch Kontingentierungen (Industrie) stimuliert.
5. Die Wirtschaft der DDR ist – bezogen auf das Rohstoffpotential der DDR – durch einen hohen Anteil von energieintensiven Industriezweigen gekennzeichnet.
6. Die Beschaffungsschwierigkeiten in allen Bereichen der Produktion haben dazu geführt, daß in

den Betrieben oft sehr viele Produkte selbst produziert werden mußten (hohe Produktionstiefe) und so die volkswirtschaftliche Arbeitsteilung nur ungenügend funktionierte. Eine solche Produktionsweise führt zu einer geringeren Produktivität sowie zu einem höheren Energieverbrauch.

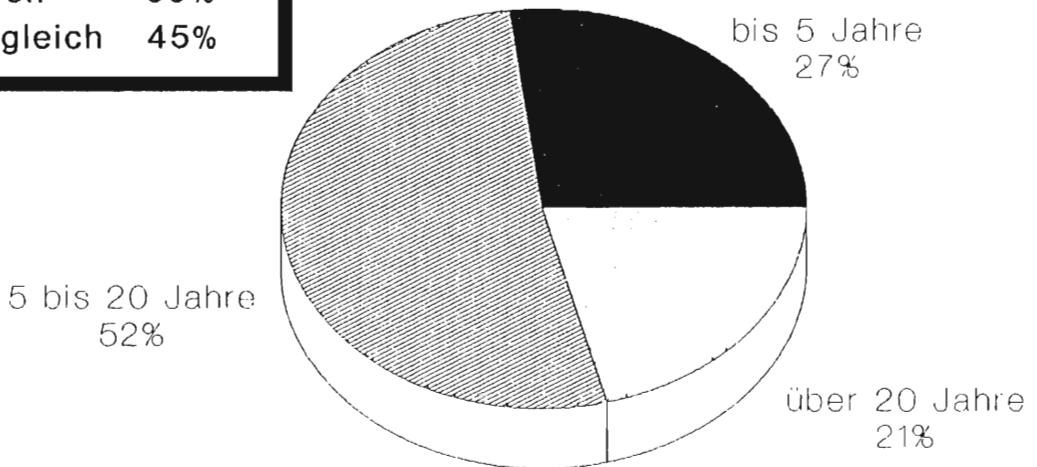
Bezogen auf die Wertschöpfung der gesamten Volkswirtschaft weist die DDR einen wesentlich höheren Verbrauch als z. B. die BRD auf. Bezieht man z. B. den Primärenergieverbrauch auf das Bruttoinlandsprodukt (BIP), so ergibt sich für die DDR ein nahezu doppelt so hoher Verbrauch [DIE WIRTSCHAFT 1990/3 u. 1990/2; IFE 1989; RWE 1988]. Im Verhältnis zu Dänemark ergibt sich ein 2,6 faches Primärenergieaufkommen je Einheit erwirtschaftetes Bruttoinlandsprodukt [NIELSEN 1989, S.8]. Auch wenn ein solcher Vergleich aus methodischer Sicht problematisch Abb. 1:

Abb. 1:

## Industrieanlagen Altersstruktur 1989

### Verschleißgrad (1987):

Industrie	53%
Bauwesen	66%
Int. Vergleich	45%



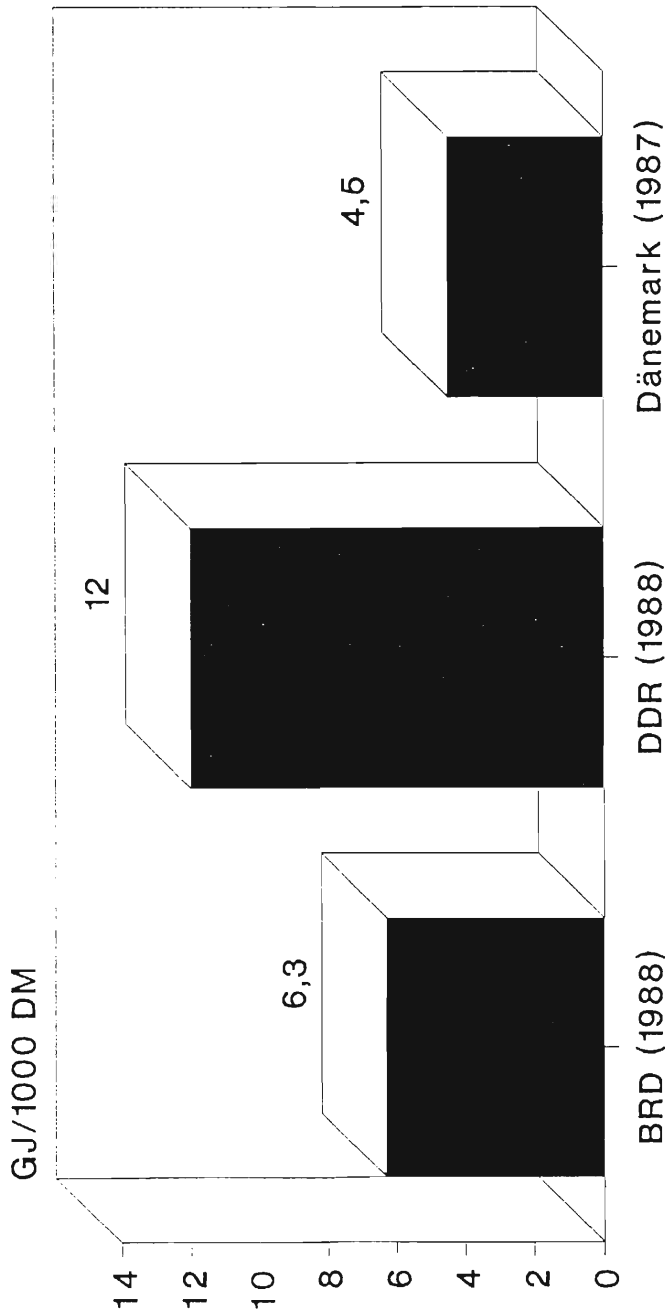
eingeschätzt werden muß, so vermittelt doch die Größenordnung der Ergebnisse einen Eindruck von der volkswirtschaftlichen Ineffektivität des Energieeinsatzes in der DDR (siehe Abb. 2).

Dabei verfügt die DDR nur über geringe eigene Energieträgervorkommen. Die Braunkohle ist die einzige nennenswerte Reserve, deren Nutzung unter ökologischen Gesichtspunkten aber sehr bedenklich ist. Die

Braunkohlenvorräte auf dem Gebiet der DDR werden auf etwa 45 Mrd. Tonnen (t) geschätzt, davon wären 25 Mrd. t nach den bisherigen Kriterien abbaubar. Würde der Abbau von rund 310 Mio. t Braunkohle im Jahr (Produktion 1988) beibehalten, so reichen die Braunkohleflöze noch rund 80 bzw. 150 Jahre. Bei dieser Rechnung bleibt jedoch unberücksichtigt, daß auf Grund der sich verschlechternden Abbaubedingungen Jahresmengen in den vorgenannten Größenordnungen nicht mehr zu fördern wären. Abb. 2:

Abb. 2

# Internationaler Vergleich Primärenergieeinsatz je Einheit BIP



BIP=Bruttoinlandsprodukt zu Preisen von 1986

Dänemark: Bruttonationalprodukt



ÖKO-Institut



UfU/ÖKO-Institut 6/90

Betrachtet man die Struktur der Energiebedarfsdeckung und ihren Verlauf (siehe Abb. 3), so ergeben sich folgende Besonderheiten:

Braunkohle und Steinkohle zusammen nur rund 28 % des Primärenergieverbrauchs ab (davon 30 % Braun- und 70 % Steinkohle).

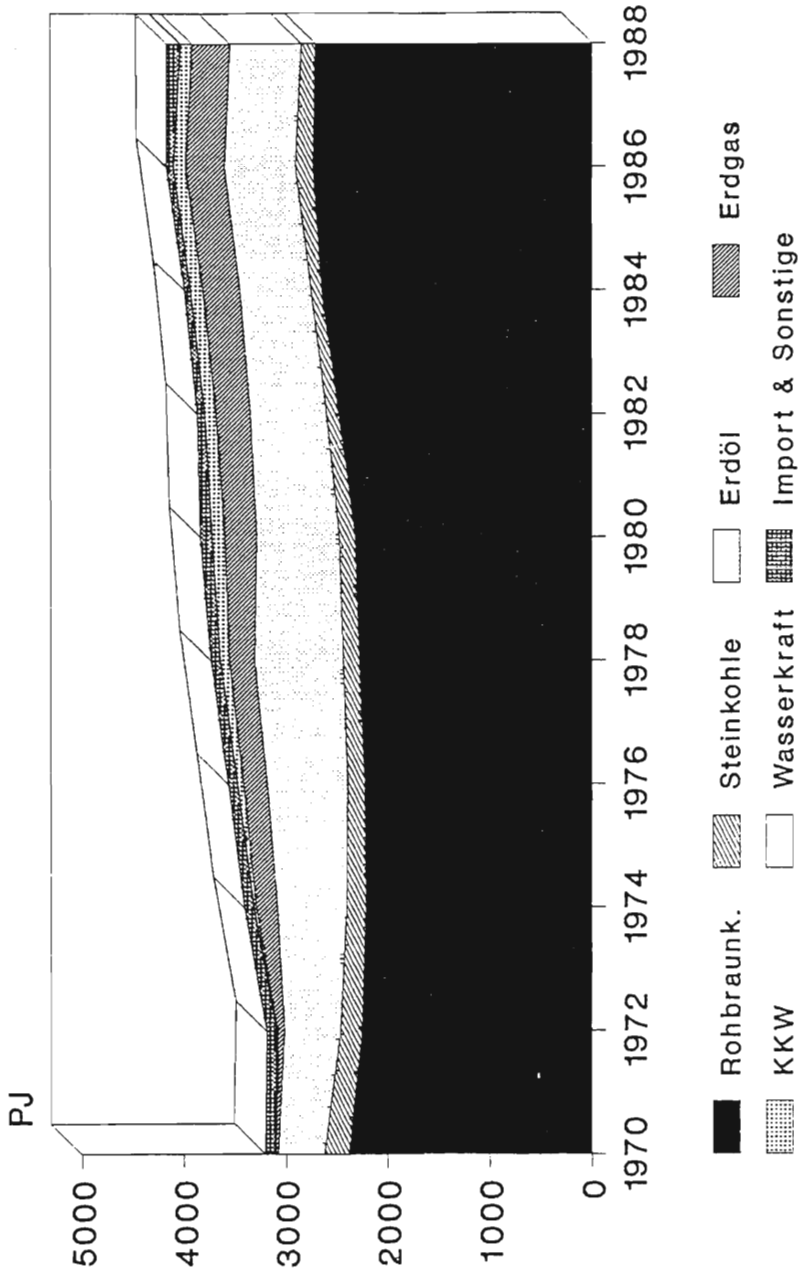
Die grundsätzliche Orientierung auf die Rohbraunkohle und die Substitution von flüssigen Brennstoffen erforderten beträchtliche Anstrengungen: die Rohbraunkohleerförderung wurde von 137 Mio. t im Jahr 1950 über 262 Mio. t (1970) auf 310 Mio. t im Jahr 1988 gesteigert.

1. Hoher Anteil fester Brennstoffe

Der Anteil fester Brennstoffe lag 1988 in der DDR mit 73,5 % sehr hoch. Der Hauptanteil wird dabei von der Rohbraunkohle abgedeckt. Nur 3 % entfallen auf die Steinkohle. In der Bundesrepublik decken hingegen

Abb. 3

# Primärenergieaufkommen



UfU/ÖKO-Institut 6/90

Für den Primärenergieeinsatz ergibt sich für das Jahr 1988 folgende Struktur [TAUTENHAHN 1989]:

festen Brennstoffe	73,5 %
davon Rohbraunkohle	68,8 %
flüssige Energieträger	13,3 %
gasförmige Energieträger	9,7 %
Atomenergie, Wasserkraft, Sonstige	3,5 %
Summe	100,0 %

## 2. Hoher Eigenversorgungsanteil

Der Anteil der Eigenproduktion am Gesamtaufkommen an Primärenergie liegt mit ca. 71 % (1988) für ein relativ rohstoffarmes Land sehr hoch. Im Vergleich hierzu, werden z. B. in der Bundesrepublik nur rund 35 % des Primärenergieverbrauchs im Inland gewonnen. Der Rest muß importiert werden.

Ein wichtiger Unterschied ergibt sich bei der Lokalisierung der durch die Energiegewinnung entstehenden ökologischen Probleme: Durch die Autarkiestrebungen in der DDR wurden wesentliche Probleme in der DDR geschaffen, während sie für die Bundesrepublik in andere Regionen verlagert wurden (Tankerunglücke, Explosionen von Förderplattformen und Pipelines etc).

Die Zielsetzung, Rohbraunkohle zum Hauptenergieträger der DDR-Energiewirtschaft zu machen, war in dem Bestreben begründet, die Energiewirtschaft in höchstmöglichem Grade unabhängig von Entwicklungen auf dem internationalen Energiepreismärkten zu machen.

Von den beiden Ölpreisschüben in den siebziger Jahren ist die DDR weniger stark getroffen worden als die BRD:

- zum einen war der Ölanteil am Primärenergieverbrauch in der DDR in diesem Zeitraum deutlich niedriger;
- zum anderen werden die Preise im RGW-Intra-blockhandel als gleitende Durchschnittswerte der Weltmarktpreise der vorangegangenen fünf Jahre gebildet. Dies verzögerte den Preisanstieg und führt in Jahren steigender Ölpreise zu einer Preis-subsidierung durch die UdSSR [DIW 1990 S.404].

Diese Verrechnungsmethode begünstigte auch die Orientierung auf den Energieträger Braunkohle: die eingekauften Rohölmengen konnten mit „Gewinn“ auf dem Weltmarkt abgesetzt und die erwirtschafteten Devisen für den Import anderer Güter verwendet werden.

Die Aufwendungen für den extrem hohen Anteil der Braunkohle am Energieversorgungssystem sind sehr hoch: Braunkohle ist ein relativ unergiebiges Energieträger: Es müssen große volkswirtschaftliche Anstrengungen unternommen werden, um diesen Energieträger zu nutzen.

So wird zum Beispiel etwa ein Drittel der Kapazitäten der Deutschen Reichsbahn mit Braunkohlentransporten gebunden. Zudem lassen sich auch bei Einsatz modernster Technologien Umweltbelastungen nicht vermeiden.

## 1.2 Gebrauchsenergie

Neben der ineffizienten Stromerzeugung ist die Struktur des Endenergieverbrauchs eine wesentliche Komponente für den hohen spezifischen Energieverbrauch in der DDR.

In der DDR wird der Begriff Gebrauchsenergie für die „verteilbare“ Energie genutzt und entspricht damit etwa dem in der BRD gebräuchlichen Begriff der Endenergie. (Die Kategorie Endenergie beinhaltet im Gegensatz zur Gebrauchsenergie jedoch nicht den Verbrauch der energieerzeugenden Betriebe! Diese Unterscheidung wird bei den Betrachtungen zur Effizienz der Stromerzeugung wichtig und dort genauer ausgeführt.)

Gebrauchsenergieträger sind z. B. elektrischer Strom, Fernwärme, Braunkohlenbriketts, Gas, jedoch auch Rohbraunkohle.

Der Gebrauchsenergie-Bedarf und seine Struktur entwickelte sich während der letzten Jahrzehnte in der DDR grundsätzlich anders als in der BRD.

Da der größte Teil der verteilbaren Energie (Gebrauchsenergie) aus Braunkohle erzeugt wird, müssen die Umwandlungsprozesse detaillierter untersucht werden. Die Abb. 4 verdeutlicht diese Tatsache: Die Erzeugung von Gebrauchsenergie aus Rohbraunkohle erfordert besonders aufwendige Umwandlungsverfahren.

Die Abb. 5 und 6 machen die Entwicklung deutlich:

Während 1970 der Pro-Kopf-Verbrauch in der DDR um etwa 10 Prozent unter dem der BRD lag, überstieg er diesen im Jahre 1986 um ca. 4 Prozent. (Alle Daten für internationale Vergleiche sind aus IFE 1988, alle nationalen Daten aus IFFE 1989 entnommen, ohne daß jeweils ausdrücklich darauf hingewiesen wird.)

Dies hat seine wesentlichen Ursachen in der ineffizienten Anwendung und in der unterschiedlich verlaufenen Entwicklung für die Struktur der Gebrauchsenergie (Abb. 7).

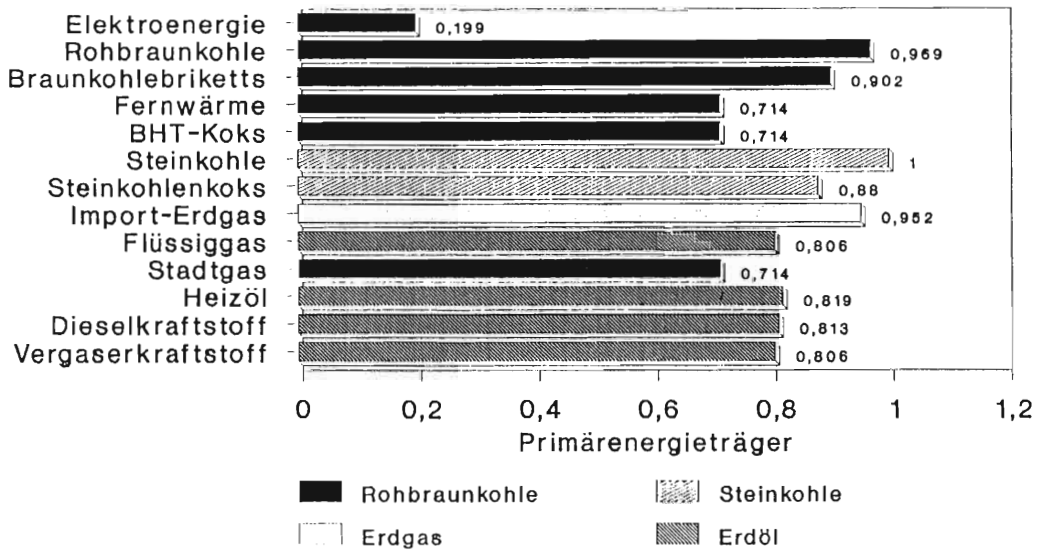
Die Strukturschwerpunkte haben sich verfestigt (feste Brennstoffe und Wärmeenergie in der DDR, flüssige Brennstoffe in der BRD) während sich z. B. der Stromverbrauch in beiden Ländern in ähnlicher Weise entwickelte:

1. Die Entwicklung für die festen Brennstoffe lief in den beiden deutschen Staaten in genau umgekehrter Richtung. Ausgehend von einem höheren Pro-Kopf-Verbrauch stieg dieser in der DDR weiter an. In der BRD wurde der niedrigere spezifische Verbrauch weiter gesenkt.
2. Der signifikant stärkere Öl- und Treibstoffverbrauch in der BRD ist durch den wesentlich höheren Motorisierungsgrad und die im Gegensatz zur DDR weite Verbreitung von Ölheizungen zu erklären.
3. In der DDR liegt durch den starken Ausbau der Fernheizungssysteme für die Wohnraumheizung (von 1970: 5,4 % auf 22,8 % 1988) der Fernwärmeverbrauch pro Einwohner eindeutig über dem der BRD (6,5 %), andererseits jedoch deutlich unter dem von Dänemark (38 %).

Abb. 4

# Gebrauchsenergie

## Effektiver Umwandlungswirkungsgrad



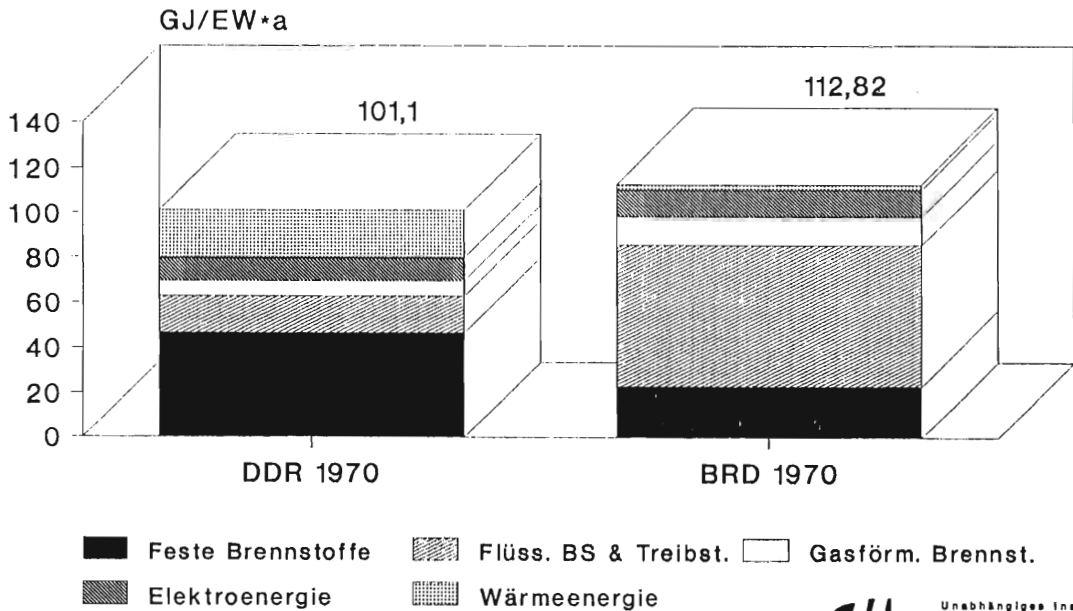
UfU/ÖKO-Institut 6/90



Abb. 5

# Vergleich DDR - BRD

## Gebrauchsenergie 1970

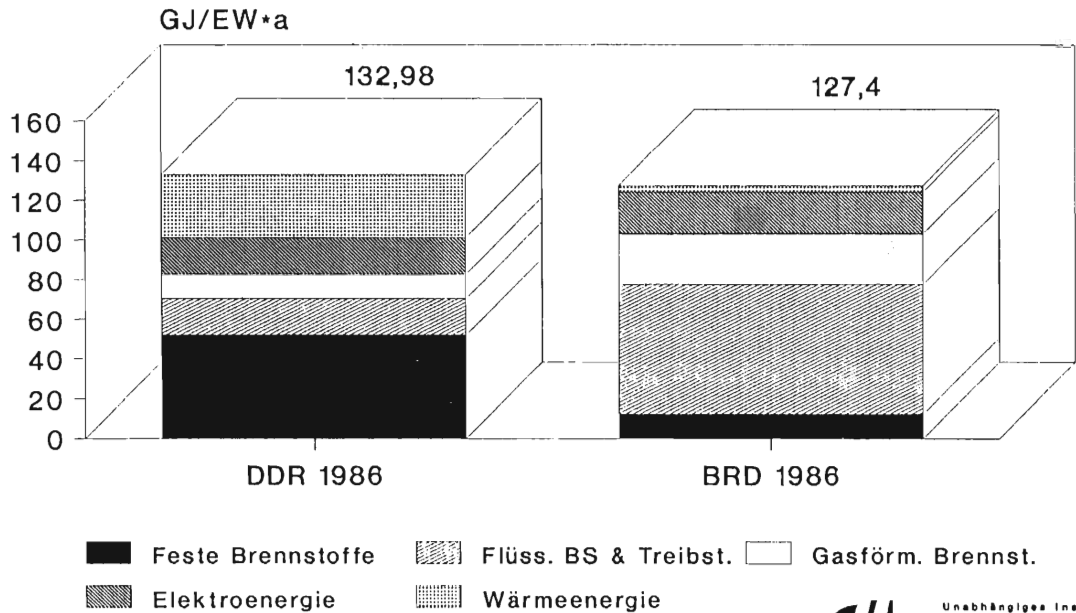


UfU/ÖKO-Institut 6/90



Abb. 6

# Vergleich DDR - BRD Gebrauchsenergie 1986

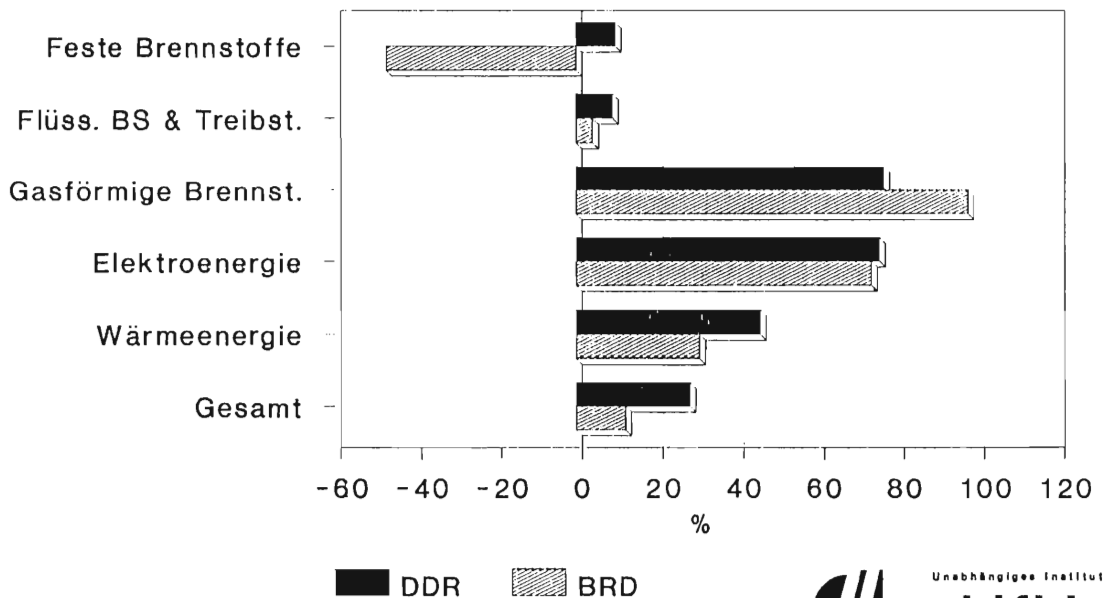


UfU/ÖKO-Institut 6/90

Unabhängiges Institut  
**UfU**  
für Umweltfragen  
ÖKO-Institut

Abb. 7

# Vergleich DDR - BRD Gebrauchsenergie 1970 - 1986

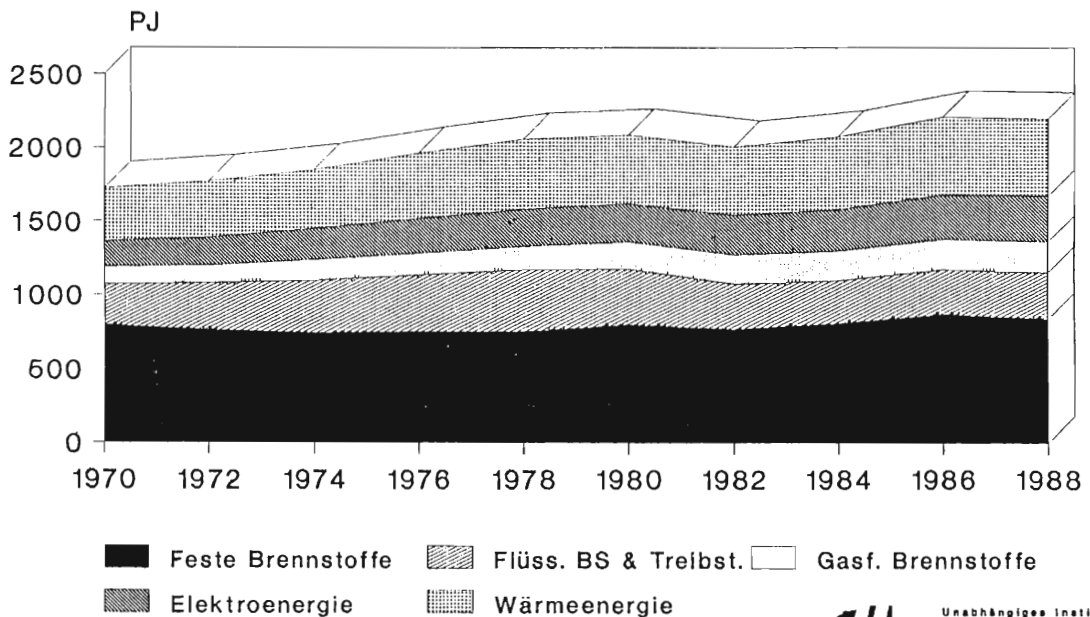


UfU/ÖKO-Institut 6/90

Unabhängiges Institut  
**UfU**  
für Umweltfragen  
ÖKO-Institut

Abb. 8

# Gebrauchsenergie Effektiver Verbrauch



Feste Brennstoffe
  Flüss. BS & Treibst.
  Gasf. Brennstoffe

Elektroenergie
  Wärmeenergie



UfU/ÖKO-Institut 6/90

4. Beim Gasverbrauch der beiden deutschen Staaten unterscheiden sich die Zuwachsraten nicht sehr wesentlich. Der spezifische Verbrauch pro Einwohner der DDR liegt jedoch heute etwa auf dem Niveau der BRD von 1970.

Die Abb. 8 zeigt die zeitliche Entwicklung des Verbrauchs an Energieträgern für die DDR.

Im folgenden wird die Umwandlung für die Energieträger Braunkohle und Erdöl betrachtet, deren Rolle für den Diskussionszusammenhang wichtig ist.

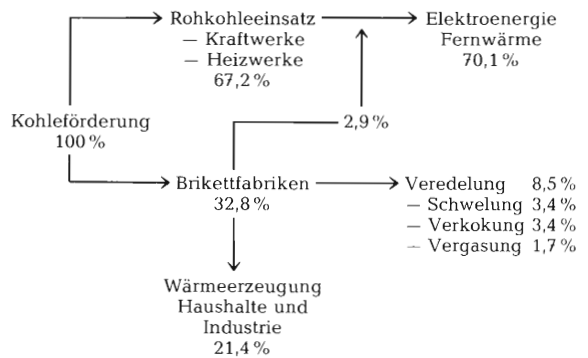
## Braunkohle

1988 wurden 67,2% (198,8 Mio. t) der geförderten Rohbraunkohle direkt für die Erzeugung von Strom und Wärme eingesetzt. Die gesamte zur Stromerzeugung eingesetzte Braunkohlenmenge beträgt nach [FFU 1990, S.49] 170 Mio. t. Rund 97 Mio. t Rohbraunkohle wurden für die Erzeugung von 49,7 Mio. t Briketts eingesetzt. Damit wird ein Spezifikum der DDR deutlich: Der Primärenergieträger Rohbraunkohle wird in großem Umfang in einen anderen festen Energieträger umgewandelt. Damit sind hohe Energieverluste und ökologische Schädigungen verbunden.

Die erzeugten 49,7 Mio. t Braunkohlenbriketts werden zur Wärmeerzeugung in Haushalten, der Indu-

strie sowie zur Erzeugung von Elektroenergie und Fernwärme in Kraft- oder Heizwerken eingesetzt bzw. durch Verschmelzung, Verkokung oder Vergasung weiter verarbeitet.

Insgesamt ergibt sich der nachfolgend dargestellte Verarbeitungsfluß für die Braunkohle (eigene Berechnungen):



## Flüssige Brennstoffe

Der Anteil der flüssigen Brennstoffe an der Energieversorgung hat vor allem durch die Maßnahmen zum Ersatz von Öl durch Rohbraunkohle in Wärmeerzeugung...

gungsanlagen und der massiven Umstellung von Gütertransporten auf die Schiene von 1970 bis 1988 leicht abgenommen.

In diesem Zusammenhang wurde auch durch die Elektrifizierung der Eisenbahnstrecken eine Verlagerung der Energieträger vom Öl zum Strom (und damit zur Rohbraunkohle) realisiert.

Diese Verbrauchssenkung war so groß, daß damit auch der ansteigende Bedarf an flüssigen Brennstoffen durch den privaten Kraftverkehr ausgeglichen werden konnte.

Deutlich wird diese Entwicklung, wenn der Einsatz von Heizöl, Diesel- und Vergaserkraftstoff betrachtet wird:

Tabelle 2

### Einsatz von flüssigen Brennstoffen

Einsatz als	1975 [Tt]	1980 [Tt]	1985			1988	
			[1975 = 100]	[Tt]	[1975 = 100]	[Tt]	[1975 = 100]
Heizöl							
Umwandlung in:							
– Kraftwerken . . . . .	2 381	2 069	86,9	890	37,4	706	29,7
– Heizwerken . . . . .	1 153	1 629	141,3	251	21,8	223	19,3
Direkteinsatz . . . . .	2 821	2 510	89,0	523	18,5	437	15,5
Gesamt . . . . .	6 355	6 208	97,7	1 664	26,2	1 366	21,5
Dieselmkraftstoff . . . . .	3 657	3 941	107,8	3 247	88,9	3 302	90,3
Vergaserkraftstoff . . . . .	1 861	2 196	118,0	2 374	127,6	2 705	145,4

Bei der Betrachtung der flüssigen Energieträger ist allerdings zu beachten, daß die sogenannte „Sonderverarbeitung“ von Erdöl (Import/Exporte durch das Unternehmen INTRAC) in den DDR-Statistiken weder unter Import/Aufkommen noch unter Export geführt wird. Über den Umfang dieses Geschäfts sind derzeit keine gesicherten Daten verfügbar.

### Fazit

Zusammenfassend läßt sich feststellen, daß der hohe Umwandlungsaufwand im Bereich der Braunkohlenutzung einer der strukturellen Gründe für die mangelnde Effizienz der Energiewirtschaft in der DDR ist. Weitere Ursachen sind jedoch offensichtlich neben dem Strombereich auf dem Gebiet der Wärmeversorgung zu suchen.

### 1.3 Stromerzeugung

1988 betrug die Bruttostromerzeugung der DDR 118,3 TWh. Weitere 1,670 TWh wurden importiert (Saldo aus Export und Import).

Damit wurden pro Kopf der Bevölkerung 7109 Kilowattstunden (kWh) erzeugt. Im Vergleich dazu belief sich die spezifische Bruttoerzeugung an elektrischem Strom in der BRD auf 6992 kWh.

Die Elektrizitätswirtschaft der DDR ist geprägt

1. durch einen hohen Anteil der Stromerzeugung auf der Basis von Rohbraunkohle,
2. durch einen hohen Anteil an Kondensationskraftwerken,
3. durch die hohen Verluste bei der Bereitstellung der Elektroenergie aufgrund der veralteten Kraftwerksstruktur,
4. durch hohe Netzverluste,
5. durch den hohen Stromverbrauch bei der Beschaffung und Umwandlung des Energieträgers Braunkohle.

zu 1.

*Braunkohle ist der dominierende Energieträger bei der Stromerzeugung*

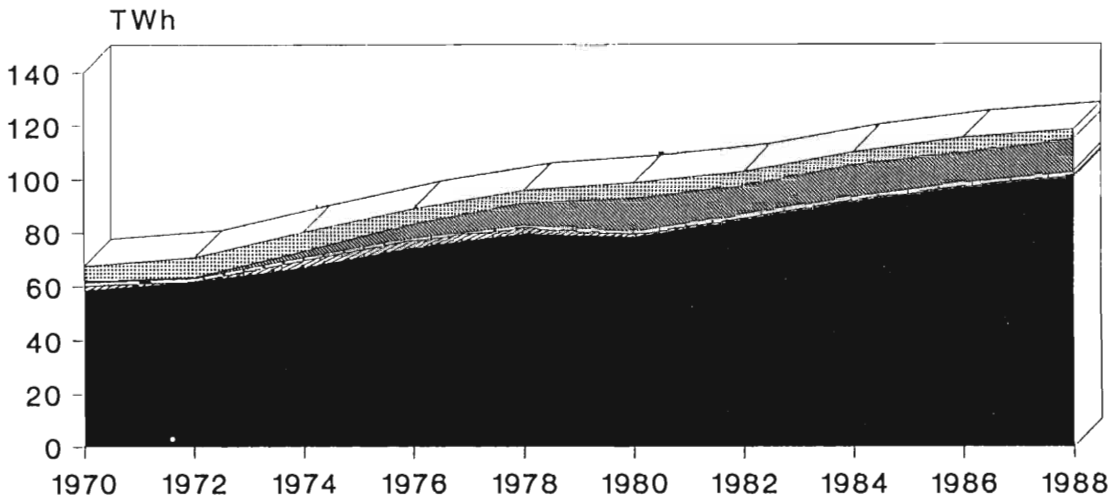
Im zeitlichen Verlauf der Bruttostromerzeugung (Abb. 9) wird die dominierende Rolle der Rohbraunkohle für die Elektrizitätswirtschaft der DDR deutlich. In den Jahren seit 1970 betrug ihr Anteil an der Stromerzeugung stets mehr als 80 %.

Ein Vergleich der Stromerzeugung zwischen der DDR und der BRD (Tab. 3) für das Jahr 1988 macht deutlich, wie sehr die Stromerzeugung der DDR auf die Braunkohle konzentriert ist (Daten für die DDR nach [ZRE 1988] und BRD nach [Elektrizitätswirtschaft 21/89]):



Abb. 9

# Elektroenergie-Bruttoerzeugung nach eingesetzten Energieträgern



Feste Brennstoffe    
  Wasserkraft  
 Flüssige Brennstoffe    
  Kernbrennstoff  
 sonst.BS (Gas, Koks)

UfU/ÖKO-Institut 6/90

Unabhängiges Institut

Tabelle 3

## Anteile der Energieträger zur Stromerzeugung im Jahr 1988

	DDR	Bundes- republik Deutschland
Feste Brennstoffe . . . . .	85,1%	48,9%
davon Rohbraunkohle ..	84,8%	18,6%
Steinkohle . . . . .	0,2%	30,3%
Flüssige Brennstoffe (Heizöl) . . . . .	0,5%	2,6%
Wasserkraft . . . . .	1,5%	4,8%
Atomenergie . . . . .	9,9%	33,6%
Gasförmige Brennstoffe, Braunkohlenschwel- koks, Trockenkohle, sonstige . . . . .	2,9%	10,1%
	100,0%	100,0%

Für die Erzeugung der Elektroenergie, die 1988 einen Anteil von 14,4 % an der gesamten Gebrauchsenergie hatte, müssen etwa 55 % der insgesamt geförderten Rohbraunkohle eingesetzt werden. (Damit beträgt der auf die Primärenergie umgerechnete Anteil der Stromerzeugung in Braunkohlenkraftwerken etwa 38 % des Primärenergieaufkommens.)

Der Anteil der Atomenergie am Stromaufkommen in der DDR ist seit Beginn der 80er Jahre mengenmäßig etwa konstant (um 11,7 TWh), ihr Anteil an der gesamten Stromerzeugung jedoch rückläufig (1980: 12 %, 1988: 9,9 %). Durch die sicherheitstechnisch bedingte Außerbetriebnahme der AKW Greifswald und Rheinsberg ist der Anteil der Atomenergie an der Stromerzeugung auf null Prozent abgesunken. In der DDR waren 1988 Kraftwerke mit einer elektrischen Leistung von 23,6 GW installiert, wobei die höchstmögliche Kraftwerksleistung bei 22,9 GW lag.

Die Höchstlast betrug 1988 17,7 GW, die größte jemals aufgetretene Höchstlast betrug 18,4 GW im Jahr 1986.

Derzeit existieren folgende Kraftwerksblöcke [FFU 1990, S.47; IFE 1989]:

Tabelle 4

#### Installierte Kraftwerksleistung in der DDR

Blockgröße [MW]	Anzahl der Blöcke	Gesamte Leistung [MW]	Anteil %
500	10	5 000	20,8
440	4	1 760	7,3
210	16	3 360	14,0
175	6	1 050	4,4
110	4	440	1,8
100	28	2 800	11,6
70	1	70	0,3
60	5	300	1,2
50	34	1 700	7,1
25–49		ca. 5 060	21,0
<25		ca. 2 500	10,4
Summe ...		ca. 24 000	100,0

Von diesen 24 000 MW Kraftwerksleistung sind 13 343 MW in Anlagen des Versorgungsunternehmens Braunkohlenkraftwerke (ehemals Kombinat Braunkohlenkraftwerke), 1 830 MW in Atomkraftwerken (Bereich des früheren Kombinats Kernkraftwerke), 2 149 MW in Kraftwerken des früheren Gaskombinats und 1 530 MW in Anlagen der territorialen Energie-Versorgungsunternehmen (Energiekombinate) installiert. Der Anteil der Industrieunternehmen an der gesamten Kraftwerksleistung beträgt 21,4 %.

zu 2.

*Der Anteil der Kraft-Wärme-Kopplung an der Stromerzeugung ist relativ klein*

Die Bruttostromerzeugung erfolgte 1988 in den folgenden Kraftwerkstypen:

Tabelle 5

#### Struktur der Kraftwerke in der DDR

Kraftwerksarten	Anteil (%)
Kondensations-Dampfkraftwerke (Braunkohle) .....	75,4
(Atomkraftwerke) .....	9,9
Gegendruck-Dampfkraftwerke .....	13,0
Gasturbinenkraftwerke .....	0,3
Wasserkraftwerke .....	1,4
Summe .....	100,0

Die Entwicklung der aus Wärme-Kraft-gekoppelten Anlagen (KWK-Anlagen) erzeugten Elektroenergie zeigt eine stark rückläufige Tendenz auf. Von einem Anteil von 24 % im Jahre 1972 sank die Erzeugung von Strom in diesen Anlagen auf 12,7 % im Jahre 1986 [ZRE 1990 S.4]. Die Ursache dafür dürfte im wesentlichen in der Nichtverfügbarkeit von entsprechenden Turbinen liegen.

Im Vergleich zur BRD ist zwar ein höherer Anteil an Gegendruck-Dampfturbinen in Betrieb, angesichts der vorhandenen Fernwärmenetze in der DDR ist dieser Anteil jedoch kleiner als dies sinnvoll erscheint.

Die Voraussetzungen für die Kraft-Wärme-Kopplung sind aufgrund der vorhandenen Infrastruktur im Fernwärmebereich relativ gut.

zu 3.

#### Veraltete Kraftwerke

Ein Blick auf die Altersstruktur der Braunkohlen-Großkraftwerke in der DDR (Abb. 10) läßt erkennen, daß die meisten Braunkohlekraftwerke bereits überaltert sind. Da die Anlagen für eine normative Nutzungsdauer von 100 000 Stunden konzipiert wurden, ergibt sich ein stetig wachsender Anteil von überalterten Anlagen (1990 55,2 %) [SCHRAMM 1988] und somit auch ein großer Ersatzbedarf.

Die veralteten Anlagen haben in der Regel einen schlechteren Wirkungsgrad. Dies bedeutet, daß für die Erzeugung einer Kilowattstunde Strom erheblich mehr Braunkohle eingesetzt werden muß als in neueren Kraftwerksblöcken. Der durchschnittliche Nettowirkungsgrad der DDR-Braunkohleblöcke wird mit rund 26 % angegeben. [Schramm 1984]. Moderne Braunkohleblöcke können jedoch einen Nettowirkungsgrad von 38 % erreichen.

In der Tab. 6 wird der Nettowirkungsgrad der DDR-Braunkohlekraftwerke dargestellt [FFU 1990 S.51].

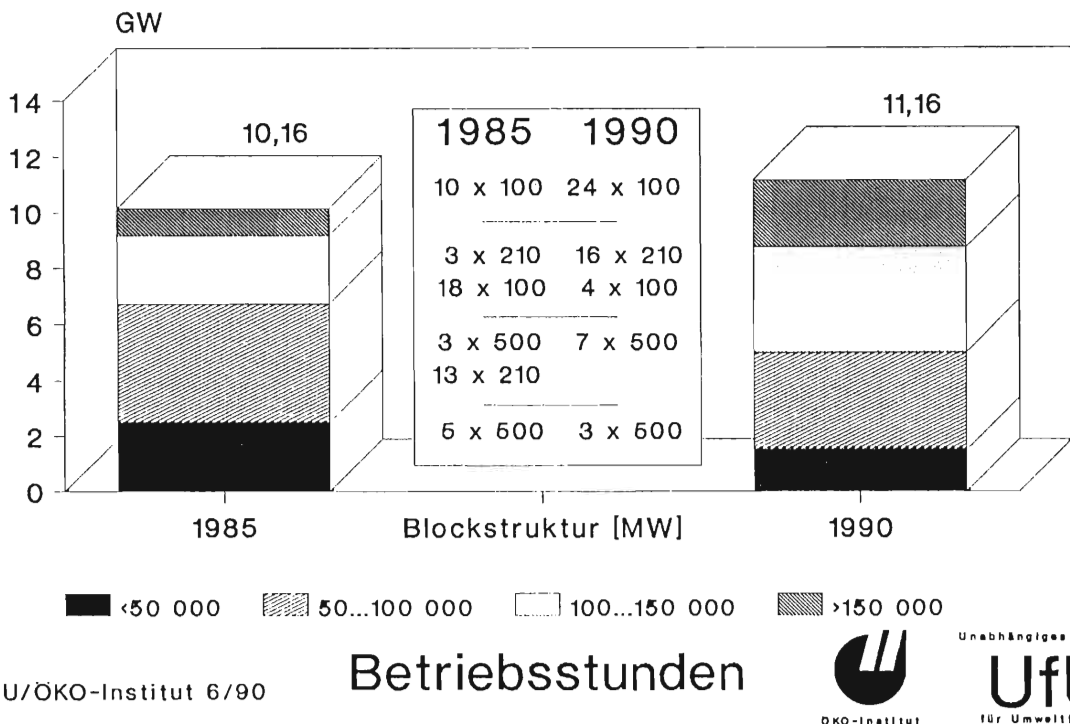
Tabelle 6

#### Braunkohlekraftwerke in der DDR

	Inst. Leistung [MW] [%]	Wirkungsgrad
Jänschwalde .....	3 000	31
Boxberg .....	3 520	30
Lübbenau-Vetschau ...	2 500	26
Völkerfreundschaft ....	1 710	28
Elbe .....	1 773	22
Thierbach .....	840	30
Schwarze Pumpe .....	1 102	13
Artur Becker .....	563	20
Espenhain .....	398	14
Lauchhammer .....	63	6

Abb. 10

# Braunkohlekraftwerke Altersstruktur



UFU/ÖKO-Institut 6/90

Betriebsstunden



Wenngleich der Unterschied zwischen den einzelnen Kraftwerken sehr groß ist, darf hier nicht der Fehlschluß gezogen werden, daß allein durch eine Rekonstruktion der Kraftwerksanlagen nach heutigem technischen Stand die Probleme zu lösen sind. Die im Kap. IV beschriebenen Ansätze machen deutlich, daß der nach Umsetzung der vorhandenen Einsparpotentiale verbleibende Reststrombedarf möglichst mit KWK-Anlagen und durch regenerative Energiequellen abgedeckt werden muß und nur der dann noch verbleibende Rest über effiziente, auch Braunkohlekraftwerke erzeugt wird.

zu 4.  
*Hohe Netzverluste*

Die Stromverteilung der DDR ist durch relativ hohe Netzverluste gekennzeichnet. Während die Stromverluste in der DDR gegenwärtig etwa 8 TWh und somit etwa 7,5% des Bruttostromverbrauchs betragen, liegt der entsprechende Wert in der BRD bei 3,7%.

Als Gründe für diese hohen Netzverluste werden vor allem angegeben:

- in den großen Entfernungen zwischen den Standorten der Großkraftwerke (Lausitz und Leipzig/Halle) und den Ballungszentren,

- im schlechten Zustand des Verteilungssystems und
- in der nicht vorhandenen Kompensation von Blindleistung auf der dezentralen Ebene.

zu 5.  
*Hoher Stromverbrauch der energieumwandelnden Industrie*

Ein weiteres Spezifikum der DDR-Elektrizitätswirtschaft liegt in der Struktur des Nettoverbrauchs (Abb. 11): Allein die energieerzeugende Industrie (d. h. Braunkohlentagebaue, Brikettfabriken etc.) verbrauchte 1986 11,3% der zur Verfügung stehenden Elektroenergie!

*Als Fazit ergibt sich: Das Stromerzeugungs- und Verteilungssystem der DDR in seiner bisherigen Struktur ist weitestgehend ineffizient.*

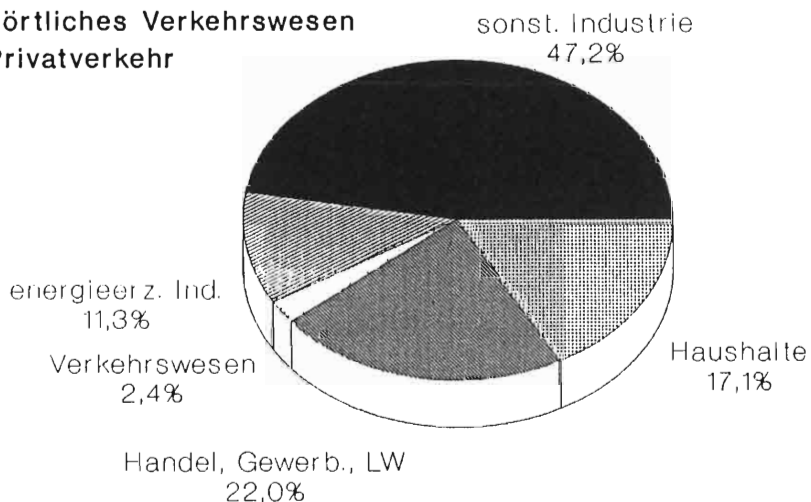
In der Abb. 12 wird die Ineffizienz der DDR-Stromerzeugung im Vergleich zu anderen europäischen Staaten für das Jahr 1986 gezeigt.

Unter den gezeigten europäischen Staaten hat die DDR die höchste spezifische Bruttostromerzeugung, während der Endverbrauch an Elektroenergie wesentlich geringer ist.

Abb. 11 **Elektroenergie-Nettoverbrauch nach Abnehmergruppen 1986**

Bemerkung:

Verkehrswesen nur Verkehrsbetriebe ohne örtliches Verkehrswesen und Privatverkehr



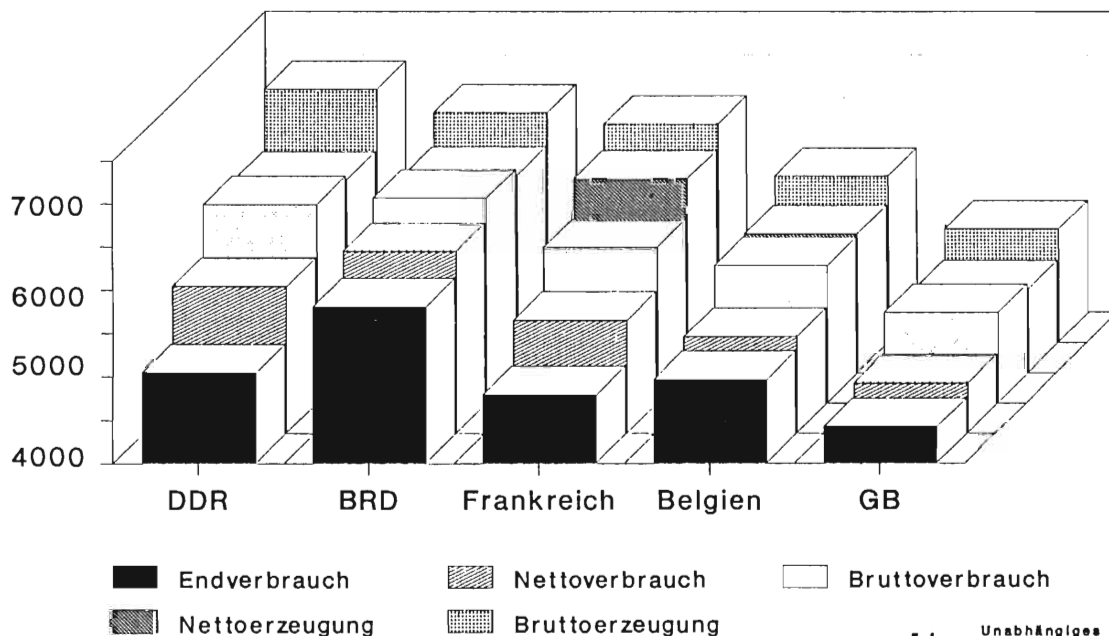
UfU/ÖKO-Institut 6/90



Abb. 12

**Elektroenergiebereitstellung**

kWh/EW\*a (1986)



UfU/ÖKO-Institut 6/90



Durch den hohen Eigenverbrauch der Braunkohlenkraftwerke entstehen schon bei der Erzeugung hohe Verluste [RECH 1989] (vgl. Tab. 7).

Im folgenden soll gezeigt werden, daß die bisherigen ökonomischen Ergebnisse genau diese Schlußfolgerung nicht zulassen, sondern im Gegenteil deutlich auf große Sparpotentiale hinweisen:

*In der DDR wird nicht zu wenig Strom verbraucht, der Strom wird nur an den falschen Stellen und zu ineffizient eingesetzt.*

Die Abb. 13 zeigt die Struktur des Nettoverbrauchs an Elektroenergie für die beiden deutschen Staaten. Da zur Effizienz der Stromanwendung in der DDR nur für einige Gebiete verlässliche Daten vorliegen, soll an dieser Stelle eine globale Betrachtung vollzogen werden. Diese gesamtwirtschaftlichen Daten beschreiben relativ präzise die Grundprobleme im Spannungsfeld von Volkswirtschaft und Energieeinsatz.

Um die Effizienz des eingesetzten Stroms zu beurteilen, müssen entsprechende Bezugsgrößen gefunden werden.

Für die produktiven Bereiche (Produktion, Dienstleistungen) ist dabei der Vergleich des Bruttoinlandsproduktes eine reale Größe.

Nach [DIE WIRTSCHAFT 1990/2] lag das Bruttoinlandsproduktes pro Kopf der Bevölkerung in der BRD um 52 % über dem der DDR. (Der Bezug ist auch bei formal vergleichbaren Größen wie dem Bruttoinlandsprodukt methodisch problematisch. Die nachfolgenden Berechnungen können deshalb nur als Tendenzabschätzungen gewertet werden, was jedoch zur

Tabelle 7

**Eigenverbrauch der Kraftwerke**

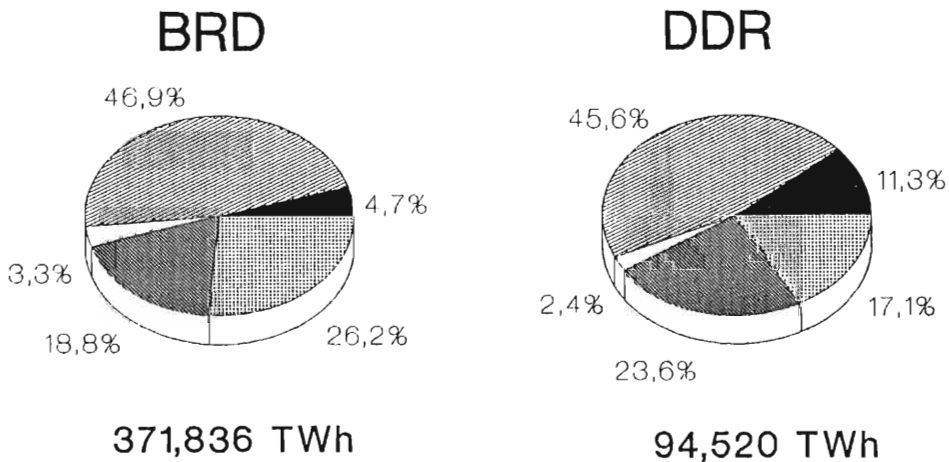
Kraftwerkstyp	Brennstoff	$P_{\text{eigen}}/P_{\text{inst.}}$ [%]
Kondensations-Kraftwerk	Öl/Gas	6 ... 8
	Steinkohle	8 ... 10
	Braunkohle	10 ... 12
Industriekraftwerk/HKW	Braunkohle	14 ... 18

**1.4 Stromanwendung**

Der Anteil der für die Volkswirtschaft effektiv verwendbaren Elektroenergie (Endverbrauch) an der Gebrauchsenergie liegt in der DDR (1987: 13,4 %) unter dem der BRD (1986: 16,5 %). Aus dieser Tatsache wird oft gefolgert, daß eine Effizienzerhöhung der Volkswirtschaft nur über die Vergrößerung des Stromanteils (durch den Ausbau der Stromversorgung) erreicht werden kann.

Abb. 13

**Vergleich DDR-BRD  
Elektroenergie Nettoverbrauch 1986**



- energieerz. Ind.
- ▨ sonstige Ind. & LW
- Verkehr
- ▤ Kleinverbraucher
- ▧ Haushalte

Charakterisierung der Stromanwendung hinreichend ist.

Der gesamte Endverbrauch an elektrischem Strom pro Kopf der Bevölkerung lag in der BRD mit 5808 kWh um 10 % über dem Verbrauch in der DDR (1988: 5248 kWh) — (Energiedaten zur BRD berechnet aus RWE 1988.)

Der Stromverbrauch in den privaten Haushalten der BRD liegt um 51 Prozent über dem der DDR. 1988 wurden in der BRD pro Kopf der Bevölkerung 1585 kWh im Haushaltsbereich verbraucht, in der DDR nur 1048 kWh.

Da der Verbrauch in den Haushalten nicht zur Schaffung von volkswirtschaftlichen Werten eingesetzt wird, muß das Verhältnis des zur Wertschaffung eingesetzten Stroms bereinigt werden.

Die zur Wertschaffung eingesetzte Elektroenergie im Jahr 1988 betrug für die DDR 4199 kWh und für die BRD 4223 kWh pro Einwohner.

#### Fazit:

*In der Bundesrepublik wird bei etwa demselben Pro-Kopf-Stromverbrauch wie in der DDR ein Bruttoinlandsprodukt geschaffen, das um 52 % höher ist als in der DDR. Damit ist der Stromeinsatz in der DDR deutlich zu ineffektiv!*

Diese Tatsache ist in erster Linie auf die weitgehend veraltete oder ungeeignet eingesetzte Anwendungstechnik und den sorglosen Umgang mit Energie zurückzuführen.

Dieser Effizienzvergleich weist aber gleichzeitig auf die gewaltigen Sparpotentiale im Strombereich hin, die im Zuge der Modernisierung der Volkswirtschaft relativ schnell erschlossen werden können.

Der geringere Stromverbrauch in den Haushalten der DDR ist auf zwei wesentliche Gründe zurückzuführen:

1. Der Anteil der elektrisch beheizten Wohnungen ist mit 0,6 % (vollbeheizt) bzw. 2,0 % (teilbeheizt) wesentlich geringer als in der BRD (etwa 9 %). In dieser Aufstellung sind nicht enthalten die transportablen Elektroheizungen. Verlässliche Angaben über deren Anteil liegen derzeit nicht vor.
2. Der Ausstattungsgrad an energieintensiven Haushaltgeräten wie Geschirrspülmaschinen oder Gefriergeräten ist in der BRD wesentlich höher als in der DDR: Zum Beispiel besitzen in der DDR etwa 43 % und in der BRD 77 % der Haushalte einen Gefrierschrank [HORIZONT 1990/7], Geschirrspülmaschinen sind in privaten Haushalten der

DDR so gut wie nicht vorhanden. Diese Tendenz überwiegt offensichtlich die spezifisch schlechtere Effizienz der elektrischen Ausstattung.

### 1.5 Wärmeerzeugung- und Anwendung

Rund 77 % der Gebrauchsenergie der DDR werden im Wärmesektor verbraucht. Das bedeutet, daß etwa 55 % der Primärenergie für Wärmezwecke verwendet werden.

Rund die Hälfte dieser Energiemenge werden für die Raumheizung verwendet (37 bis 38 % der Gebrauchsenergie). 1988 wurden etwa 788 Petajoule Gebrauchsenergie für die Heizung von Gebäuden genutzt. Dabei ist jedoch zu berücksichtigen, daß der Energieverbrauch für die Raumheizung stark witterungsabhängig ist (1985: 840 PJ — 1987: 924 PJ). Damit werden etwa 27 % der eingesetzten Primärenergie für die Raumheizung genutzt.

Etwa 46 % davon entfallen auf die Bevölkerung. Zur Beheizung von Industriegebäuden wurden 19,3 % (1988) eingesetzt, der Rest wird von den sonstigen Verbrauchern (Kommunen etc.) in Anspruch genommen. 844,6 PJ wurden im Jahr 1988 in der Produktion als Prozeßwärme eingesetzt.

Die Wärmeerzeugung und Wärmeanwendung in der DDR weist folgende Charakteristika auf:

1. Die Beheizungsstruktur der Wohnungen unterscheidet sich sehr deutlich von der BRD: Im Wohnungsbestand überwiegen Einzelofenheizungen, die nahezu ausschließlich mit Braunkohlenbriketts beheizt werden. Andererseits ist der Anteil der fernwärmebeheizten Wohnungen wesentlich größer als in der BRD.
2. Die Effizienz von Heizwerken ist relativ gering, da unabhängig von der Versorgungsgröße einheitliche Heizwerke zum Einsatz kamen und durch die Umorientierung auf Rohbraunkohle ein Brennstoff verwendet wird, für den die Heizwerke ursprünglich nicht ausgelegt waren.
3. Die Bauphysik der Gebäude, insbesondere der Bauten bis 1975 ist sehr schlecht.
4. Die fernwärmebeheizten Wohnungen werden pauschal abgerechnet.
5. Die Wärmeanwendung in der Industrie zeichnet sich durch eine geringe Effizienz aus.

zu 1.

#### Heizungsstruktur

Der Wohnungsbestand in der DDR erhöhte sich von etwa 6 Millionen im Jahr 1970 auf knapp 7 Mio. im Jahr 1988. Die Struktur nach Heizungssystemen gliedert sich wie folgt:

Heizungssysteme in der DDR

Heizungssystem	1970		1988	
	[1 000 WE]	[%]	[1 000 WE]	[%]
Fernwärmeheizung . . . . .	330,0	5,4	1 594,1	22,8
Gasheizung . . . . .	23,0	0,4	556,3	8,0
(davon vollbeheizt) . . . . .	—	—	(161,8)	(2,3)
Elektronachtspeicherheizung . . . . .	9,0	0,1	182,3	2,6
(davon vollbeheizt) . . . . .	—	—	(45,1)	0,6
Etagenheizung (feste Brennstoffe) . . . . .	321,0	5,3	962,9	13,8
Einzelofenheizung (feste Brennstoffe) . . . . .	5 374,0	88,7	3 692,2	52,8
Summe . . . . .		100,0		100,0

Über die Hälfte der Wohnungen in der DDR werden mit Einzelofenheizungen beheizt. Berücksichtigt man, daß neben den Einzelofenheizungen auch Etagenheizungen und die fernwärmeversorgten Wohnungen mit festen Brennstoffen beheizt werden, so kommt man zu dem Ergebnis, daß rund 90 % aller Wohnungen der DDR mit festen Brennstoffen beheizt werden.

Die Braunkohle weist gegenüber Erdgas und leichtem Heizöl eine höhere Schwefel- und Staubbelastung auf. Weiterhin haben die Einzel- und Etagenheizungen einen geringeren Wirkungsgrad weshalb die derzeitigen Heizungen die Umwelt wesentlich stärker belasten als in der BRD. In den Heizperioden werden etwa 50 % der städtischen Luftverschmutzungen in der DDR durch den Hausbrand verursacht!

In der Bundesrepublik werden rund 80 % aller Heizanlagen mit Erdgas oder Heizöl befeuert. Mit Fernwärme und elektrischen Nachtspeicherheizungen werden je 9 % beheizt.

Die derzeitige Struktur der Wärmeversorgung in den Haushalten der DDR machen in den nächsten Jahren große Veränderungen notwendig. Dabei besteht in der jetzigen Situation die Chance, einen noch größeren Anteil der Wohnungen auf Nahwärme umzustellen, wobei diese Nahwärme auf der Basis von Kraft-Wärme-Kopplungsanlagen (Energieträger Erdgas oder Biogas) erzeugt werden könnte. Diese Heizungsform ist mit Abstand diejenige, die die geringsten Emissionen an  $\text{NO}_x$ ,  $\text{SO}_2$  und  $\text{CO}_2$  verursacht.

zu 2.

#### Geringe Effizienz von Heizwerken

In der DDR wurde 1985 in 173 Heiz- und Industriekraftwerken sowie in 757 Heizwerken Fernwärme erzeugt.

Mittels Fernwärme können Haushalte umweltschonend beheizt und mit Warmwasser versorgt werden. Dies setzt jedoch voraus, daß der Energieträger bei der Umwandlung (möglichst in KWK-Anlagen) sinnvoll genutzt wird und die Leitungsverluste gering ge-

halten werden. Die Fernwärmesysteme der DDR erfüllen diese Voraussetzung in vielen Fällen nicht. So führte z. B. die Vereinheitlichung der Heizwerke dazu, daß diese nur mit geringerer Effizienz arbeiten und eine höhere Umweltbelastung verursachen:

„Bei den Energieerzeugungs- bzw. -umwandlungsanlagen gilt noch in weit stärkerem Maße als bei den Energieanwendungsanlagen, daß eine Anlage nicht für alle Anwendungsfälle optimal ist. Die derzeit alleinige Errichtung von Typenheizwerken ausschließlich auf der Basis von Rohbraunkohle zur Wärmeversorgung ist ökologisch und ökonomisch nicht gerechtfertigt . . . zur optimalen Bedarfsdeckung in einem Wärmeverbundsystem [sind] Grundlast-, Mittellast- und Spitzenlastheizwerke erforderlich . . . die sich in Bezug auf Auslegung und Brennstoff . . . wesentlich unterscheiden.“ [MEHLIG 1990b]

In den 80er Jahren fand eine Umorientierung bei den kleineren Fernheizwerken statt. Die bislang als Energieträger verwendeten Braunkohlebriketts wurden durch den Energieträger Rohbraunkohle abgelöst. Dies führte zu beträchtlichen Effizienzverschlechterungen:

„Die in der DDR bestehenden dezentralen ca. 54 000 Kleinkessel mit einer Leistung 1 MW sind vorzugsweise im kommunalen und industriellen Bereich für den Braunkohlenbriketteinsatz ausgelegt, bei der Rohbraunkohleverwendung dagegen leistungsgemindert und ineffektiv.“ [TUD 1989 S.4]

zu 3.

#### Schlechter baulicher Zustand

Zur Ausrüstung der Gebäude mit großteils veralteten und ökologisch bedenklichen Heizungsanlagen kommen bauphysikalisch unzureichend ausgelegte Gebäude (Wärmedämmung, Fenster etc.) mit weitgehend fehlender Steuer- und Regelungstechnik sowie mangelnde Qualität in Bauausführung und Bauabnahme.

Diese Aussagen treffen prinzipiell sowohl auf die durch Neubau zusätzlich errichteten als auch auf die

durch Rekonstruktion modernisierten Wohnungen zu. So wurden z. B. Altbauten rekonstruiert, ohne wesentliche Verbesserungen der Wärmedämmung vorzunehmen oder die Heizungsanlagen zu erneuern: Von den 726 000 zwischen 1982 und 1989 modernisierten Wohnungen wurden nur 262 000 (36 %) mit modernen Heizungen ausgerüstet [DIE WIRTSCHAFT 1990/8].

Nach Angaben des Bauministeriums sollen 75 % des Gebäudebestandes sanierungsbedürftig sein.

Die in der Literatur angegebenen durchschnittlichen Energieaufwendungen für die Heizung einer Wohnung (58 . . . 60 m<sup>2</sup>) unterliegen folgender Entwicklung:

Tabelle 9

### Geplanter Energieverbrauch pro Wohnung

Wohnungstyp	Baujahr	[GJ/a]	Quelle
Neubau (Einschichtplatte)	ca. 1970	65	[Mehlig 1990 b S. 67 ff]
Neubau	ca. 1975	57	[Gebhardt 1986 S. 578] <sup>3)</sup>
Neubau (verbesserte WBS 70)	ca. 1985	33	[Gebhardt 1986 S. 578]
Altbau mit Einzelofen	o. J.	48	[MSI 1990] <sup>4)</sup>

Als Vergleich hierzu mag der Energieverbrauch von 9 GJ/a dienen, der bei der sogenannten Niedrigenergiebauweise beim Neubau in der Bundesrepublik erreicht wird. Dabei amortisieren sich die die Kosten für die zusätzlichen Maßnahmen innerhalb ihrer Lebensdauer.

zu 4.

#### Pauschale Abrechnung von Fernwärmeheizungen und Zentralheizungen

Die o. g. Werte sind in der Regel Auslegungswerte, die durch die fehlenden Abrechnungsmöglichkeiten vor allem in fernwärmeversorgten Wohnungen in der Praxis weit überschritten werden. So werden die den Berechnungen zugrunde gelegten Temperaturen in vielen Wohnungen und Gebäuden um bis zu 5 Kelvin überschritten.

In [MSI 1990] wird der effektive Verbrauch für die einzelnen Energieträger wie folgt angegeben:

Tabelle 10

### Abgerechneter Energieverbrauch

Energieträger	Verbrauch für eine durchschnittliche Wohnung (55 m <sup>2</sup> ) [GJ]
Fernwärme . . . . .	54,7
Braunkohlenbriketts ..	48,3
Stadtgas . . . . .	39,7
Elektroenergie . . . . .	17,3

Die mit Fernwärme versorgten Wohnungen haben keine Wärmezähler, sie werden mit Pauschalpreisen abgerechnet. Öffentliche Gebäude verfügen wie Industriebetriebe über Energiekontingente.

Auch diese Kontingentierung führte zu energieverwendenden Verhaltensweisen: Der Minderverbrauch an Energie konnte eine Kürzung des Kontingents nach sich ziehen. So entwickelte sich aus dem eigentlichen Zweck der Begrenzung (Energieverbrauchs-Einschränkung durch erhebliche Aufpreise bei Kontingentüberschreitungen) eine unzureichende Motivation zur konsequenten Energieeinsparung. Um in einem kalten Winter das Kontingent nicht zu überschreiten versuchte jeder Abnehmer (Betrieb, öffentliche Einrichtung) das Lieferkontingent möglichst hoch zu veranschlagen und dann auch zu verbrauchen, notfalls auch ohne jeden Sinn.

zu 5.

#### Geringe Effizienz auch in der Industrie

Als Indiz für die Ineffizienz der für die Raumheizung von Industriegebäuden eingesetzten Energie mag die Tatsache gelten, daß mehr als 50 % der Industriebauten nur einfach verglaste Fenster haben, wobei diese etwa 60 % der Wandflächen ausmachen [TG 1988].

Umfassende Untersuchungen über die Effizienz der industriell eingesetzten Wärme liegen zur Zeit nicht vor. Aus der Analyse der eingesetzten Industrieanlagen lassen sich jedoch erhebliche Verschwendungspotentiale ableiten. Als Hinweis auf die Verschwendungs-/Einsparungspotentiale sind erstens die rein technisch erschließbaren Energiemengen zu nennen. So sind beispielsweise durch verbesserte Wärmedämmungen an Industrieöfen die Wandverluste um bis zu 30 % zu senken.

Andererseits schrieb [Jungnickel 1989]: „So werden Anlagen mangels MSR- [Meß, Steuer- und Regels-] Technik oft ‚blind‘ gefahren, nicht selten laufen Maschinen längere Zeit leer, sind kälte- oder wärmeführende Rohre nicht isoliert, am Wochenende ungenutzte Gebäude werden beheizt.“

Fazit: Wenngleich die Analyse der Ist-Situation aufgrund der derzeitigen Datenlage noch viele Fragen offenläßt, so läßt sich doch ableiten, daß das Einspar-



potential im Wärmebereich in der DDR noch um eine Größenordnung höher einzuschätzen ist als in der Bundesrepublik. Dies bedeutet jedoch auch, daß gerade die konsequente Erschließung dieser Potentiale die wirtschaftlichste Form der Energiegewinnung darstellt. Dabei darf nicht übersehen werden, daß gerade auch der Wärmesektor mit dem Strombereich eng verknüpft ist:

– durch die Einsparung von Braunkohle wird der Stromverbrauch der energieerzeugenden Industrie reduziert und Investitionen in die Braunkohleförderung und in die Stromerzeugung vermindert,

– durch die gleichzeitige Produktion von Strom und Wärme in Blockheizkraftwerken wird Strom in Kondensationskraftwerken verdrängt.

### 1.6 Nichtenergetischer Bereich

Der nichtenergetische (stoffliche) Einsatz von Primärenergie in der DDR ist vor allem auf den Energieträger Erdöl konzentriert. Betrachtet man nur die in den Statistiken ausgewiesenen Werte, so ergibt sich für die stoffliche Nutzung folgende Struktur [ZRE 1988]:

Tabelle 11

### Stoffliche Nutzung der Primärenergie

Energieträger	Primärenergie		Anteil an Primärenergie träger
	[PJ]	[PJ]	[%]
Erdöl und Teersubstanz .....	178,5	178,5	25,4
Zwischensumme Öl .....			
DDR-Erdgas .....	0,9	53,4	14,3
Import-Erdgas .....	52,5		
Zwischensumme Gas .....			
BTT-Koks (Synthesegaserzeugung) .....	12,8		
Hochofenkoks (Karbiderzeugung) .....	9,6		
Anthrazit (Karbiderzeugung) .....	0,3	32,8	1,2
Industriekoks (Karbiderzeugung) .....	1,5		
BHT-Koks (Karbiderzeugung) .....	8,6		
Zwischensumme feste Brennstoffe .....			
Gesamt .....	264,7	264,7	6,4

So werden nur 6,4% der Primärenergie stofflich genutzt. Der größte Teil der stofflich genutzten festen Primärenergieträger ist mit der energetisch und ökologisch kaum aufrecht zu erhaltenden Karbidproduktion in Buna verbunden und dürfte so perspektivisch entfallen.

Durch die in 1.1 erwähnte „Sonderverarbeitung“ dürfte sich die grundsätzliche Struktur nicht verändern, da im wesentlichen Erdöl importiert und Folgeprodukte von Erdöl exportiert werden. Da keinerlei sichere Daten zu diesem speziellen Gebiet vorliegen, wird im Folgenden darauf nicht Bezug genommen.

## 2. Umweltbelastung und Gefährdung durch Braunkohle

### 2.1 Abbau und Emissionen

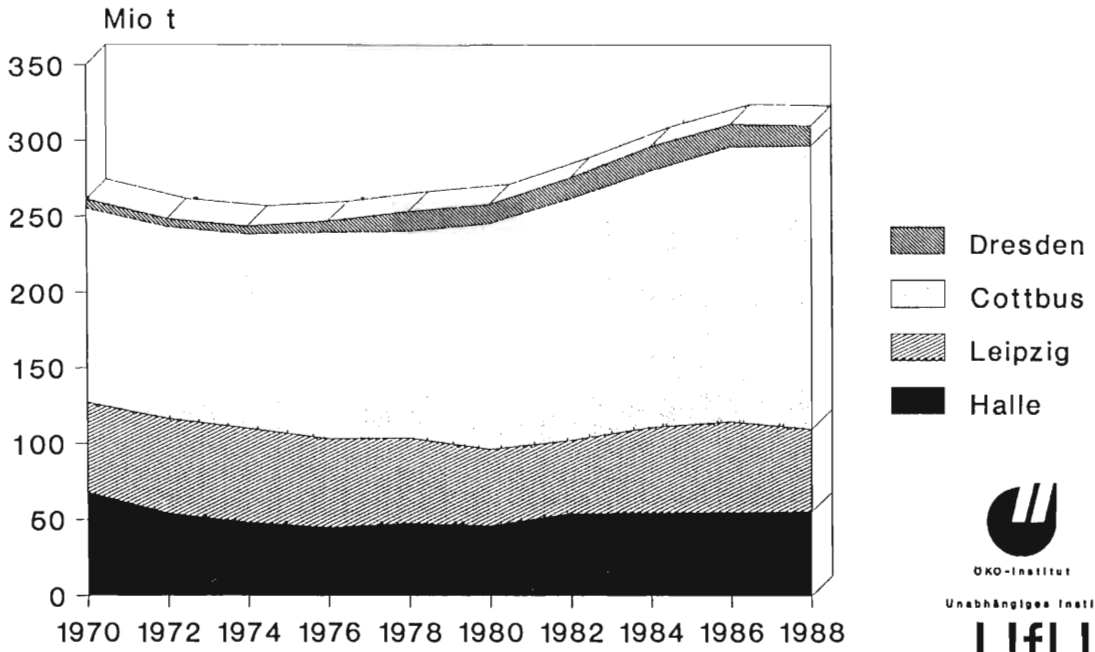
1988 wurden in der DDR etwa 310 Mio. t Rohbraunkohle gefördert. Durch die Förderung und Verbrennung der Braunkohle entstehen eine Reihe von Problemen.

Die Abb. 14 zeigt die Braunkohlenvorkommen auf dem Gebiet der DDR [STRODZKA 1989].

Abb. 14

# Rohbraunkohle

## Förderung nach Abbaugebieten



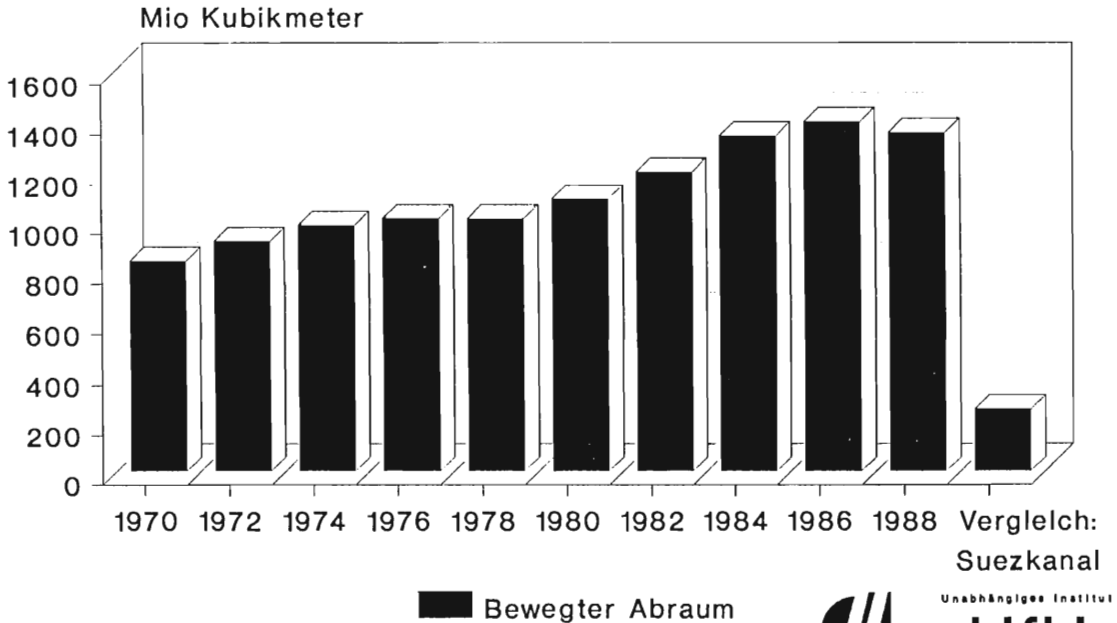
UfU/ÖKO-Institut 6/90



Abb. 15

# Braunkohleförderung

## Abraumbewegung



UfU/ÖKO-Institut 6/90



**Braunkohlecharakteristik**

Fördergebiet	Wassergehalt [%]	Aschegehalt [%]*	Gesamt-schwefelgehalt [%]*	Förderanteil [%]		
				1970	1980	1988
Niederlausitz .....	58,3	5,0	0,8	51,4	62,6	64,6
Halle-Leipzig .....	53,6	11,2	4,6	48,6	37,5	35,4
Magdeburg .....	42,2	8,8	1,8	siehe Halle/Leipzig		

\*) bezogen auf wasserfreie Kohle

Der Aufschluß und der Betrieb von Tagebauen erfordert gewaltige Eingriffe in die Landschaft. Im Zeitraum von 1971 bis 1988 wurden 567 km<sup>2</sup> landwirtschaftlicher oder forstwirtschaftlich genutzter Fläche devastiert, während nur 404 km<sup>2</sup> rekultiviert wurden [MFU 1990 S.18]. Die Wiederurbarmachungsleistungen blieben quantitativ und hinsichtlich der Qualität der Rückgabeflächen immer weiter hinter dem Flächenentzug zurück“.

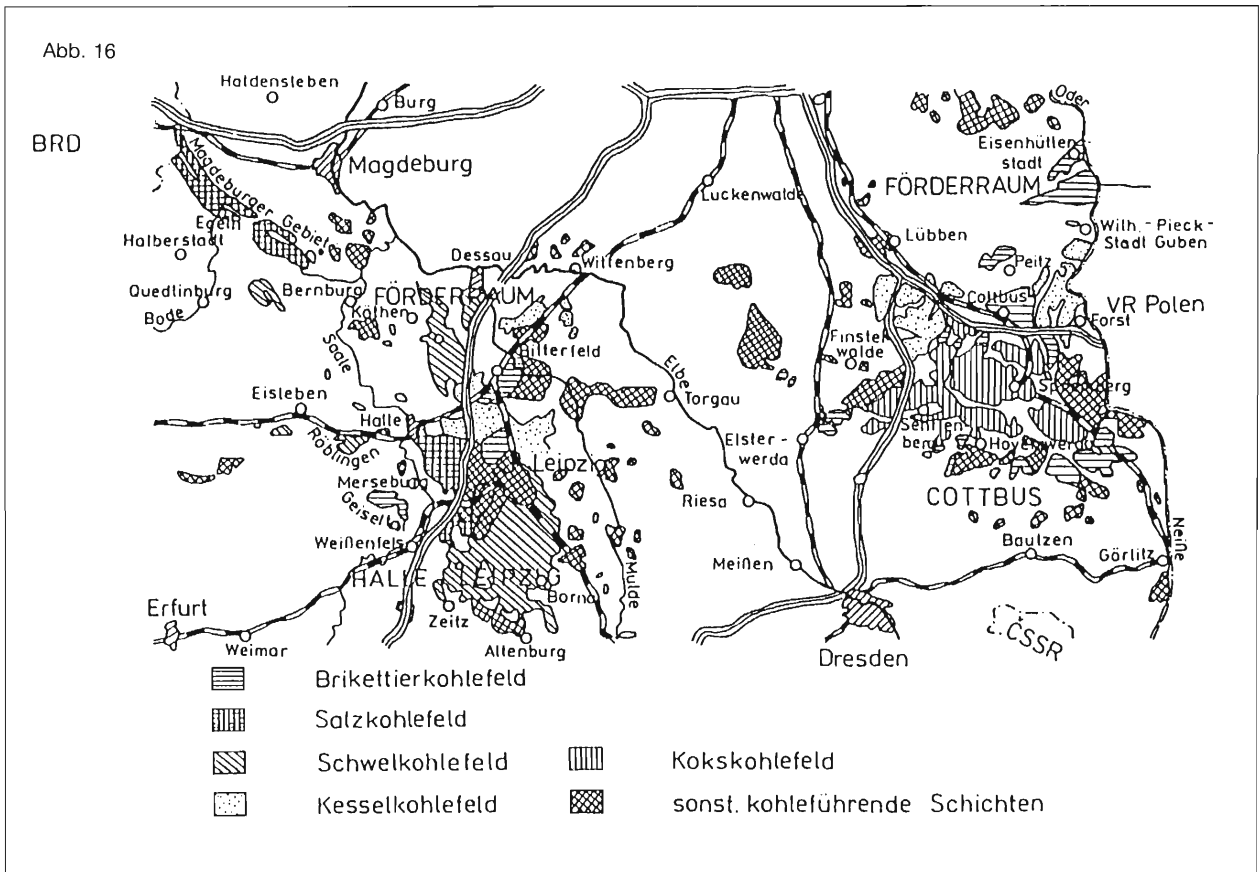
Die Abb. 15 zeigt die Entwicklung der zu bewegenden Abraummassen.

Bereits bis zum Jahr 1980 wurden in der DDR 75 Ortschaften abgebaggert, rund 30 000 Einwohner umge-

siedelt und 70 km Flußläufe verlegt. Die Abb. 16 zeigt die Braunkohleabbaugebiete in der DDR.

Speziell die Grundwasserabsenkungen stellen empfindliche Eingriffe in die Ökosysteme dar, bei denen besonders ältere Bäume, deren Wurzelwerk sich nicht regenerieren kann, abgeholzt werden müssen [STRODZKA 1989 S.49].

Durch die Verbrennung der Braunkohle wird in der DDR der größte Teil der Schwefeldioxid- und Staube-missionen verursacht [MFU 1990 S.23]. Die Emissionswerte stellen wahrscheinlich grobe Schätzungen dar. Eigene berechnungen der beiden Institute ergeben für Schwefeldioxyd den Wert von etwa 5,5 Mio. Tonnen.



Karte der Braunkohlenvorkommen in der DDR

Tabelle 13

**Schadstoffemissionen**

	Gesamt-emission [10 <sup>3</sup> t]	Anteil der Energie- erzeugungs-Anlagen		sonst. Bereiche	
		[10 <sup>3</sup> t]	[%]	[10 <sup>3</sup> t]	[%]
Schwefeldioxid .....	5 209	5 031	96,6	178	3,4
Staub .....	2 199	1 914	87,0	285	13,0
Stickoxide .....	709	297	41,9	412	58,1

Die geringere Rolle der Stickoxidemissionen ist eine Folge der geringeren Temperaturen bei der Braunkohlenverbrennung.

Die Gesamtemissionen verteilen sich nach [MFU 1990 Anlage 1] wie folgt:

Tabelle 14

**Emissionsquellen**

	SO <sub>2</sub> [%]	Staub [%]	NO <sub>x</sub> [%]
Energieerzeugungsanlagen ..	76,7	54,7	41,9
Produktionsanlagen .....	6,1	20,0	9,9
Hausbrand .....	7,4	7,5	1,0
Kleinverbraucher .....	1,9	3,8	0,7
sonstige Betriebe .....	7,9	14,0	3,6
Verkehr .....	—	—	43,3

Politische und ökologische Brisanz haben die grenzüberschreitenden Luftverschmutzungen durch Schwefeldioxid [IFU 1990 Anlage 5]:

Tabelle 15

**Schadstoffexport und -import**

Land	Export [10 <sup>3</sup> t]	Import [10 <sup>3</sup> t]
Norwegen, Schweden, Finnland .....	128	0
Polen .....	486	36
CSFR .....	232	112
BRD .....	188	82
gesamt .....	1 034	230

Die Emissionen von Schwefeldioxid, Stickoxiden und Staub werden im folgenden für die einzelnen Bezirke und das Jahr 1988 dargestellt [MFU 1990]. (Die Emissionswerte für Stickoxyde werden hier offensichtlich ohne den Verkehrsbereich ausgewiesen.)

Tabelle 16

**Emissionsquellen**

Bezirk	SO <sub>2</sub>			NO <sub>x</sub>			Staub		
	[kt]	[t/km <sup>2</sup> ]	[kg/EW]	[kt]	[t/km <sup>2</sup> ]	[kg/EW]	[kt]	[t/km <sup>2</sup> ]	[kg/EW]
Berlin .....	67	166	53	9	22	7	30	74	243
Cottbus .....	1 373	166	1 551	138	17	156	475	57	537
Dresden .....	416	62	236	30	4	17	223	33	127
Erfurt .....	232	32	187	13	2	11	133	18	107
Frankfurt/O. ....	121	17	170	18	3	25	101	14	142
Gera .....	178	44	240	10	3	13	56	14	76
Halle .....	986	112	555	67	8	38	471	54	265
Chemnitz .....	275	46	148	17	3	9	107	18	58
Leipzig .....	936	189	687	42	8	31	236	48	173
Magdeburg .....	190	17	152	12	1	10	141	12	113
Neubrandenburg	63	6	102	4	0	7	43	4	69
Potsdam .....	116	9	103	33	3	30	64	5	57
Rostock .....	69	10	75	5	1	5	36	5	39
Schwerin .....	75	9	126	4	0	6	39	4	66
Suhl .....	112	29	204	6	1	10	44	11	80
DDR-Insgesamt .	5 209	48	313	408	4	25	2 199	20	132

Die stärksten Emissionsdichten ergeben sich mit großem Abstand in den Bezirken Cottbus und Halle/Leipzig. Somit ist die Braunkohle für die Luftbelastung nicht nur stofflich sondern auch regional dominant.

Ein weiteres Problemfeld, die sichere Deponie der Braunkohlenaschen, wurde bisher in der DDR kaum thematisiert und auch nicht gelöst.

## 2.2 CO<sub>2</sub>-Emissionen durch Braunkohle

Die DDR emittiert durch den hohen Anteil der Braunkohle beträchtliche Mengen des Treibhausgases CO<sub>2</sub>. Legt man die Emissionsfaktoren nach [MICHAELIS 1988] zu Grunde, so ergibt sich die folgende, sehr grob überschlagene Emissionsstruktur:

Tabelle 17

### CO<sub>2</sub>-Emissionen

Primärenergieträger	Anteil 1988 [PJ]	Stoffliche Nutzung [%]	Minderungs- faktor*)	Emission [Mio. t]	Anteil [%]
Rohbraunkohle .....	2 699,4	1	0,95	281,8	79,9
Steinkohle .....	139,3	7	—	11,8	3,3
Öl .....	701,6	25	—	42,3	12,0
Gas .....	373,3	15	—	16,7	4,8
Gesamt .....				352,6	100,0

\*) Minderungsfaktor für Abriebverluste etc.

Als jährliche Gesamtemission läßt sich also die Größenordnung von 350 Mio. t CO<sub>2</sub> ansetzen. Die dominierende Bedeutung der Braunkohlenverbrennung wird durch den Anteil von fast 80 % dokumentiert.

## 2.3 Vergleich der Emissionsbelastung im internationalen Vergleich, Bildung von Kennzahlen

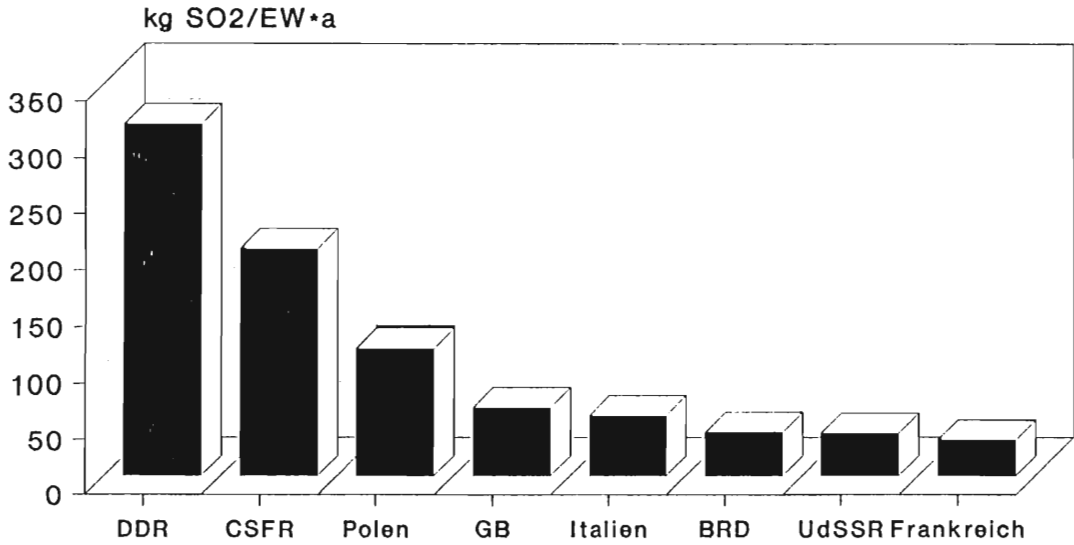
An Hand des Leit-Schadstoffes Schwefeldioxid und des Treibhausgases Kohlendioxid soll die überproportional große Umweltbelastung durch die DDR-Energiwirtschaft gezeigt werden.

Die Abb. 17 und 18 zeigen, daß die DDR sowohl bezüglich der Pro-Kopf-Emission an Schwefeldioxid als auch des Ausstoßes an Kohlendioxid an der Spitze der gezeigten Staaten und damit der ganzen Welt steht.

Wesentlichster Grund für diese Tatsache ist die Braunkohlenverbrennung.

Abb. 17

## Spezifische Emissionen Schwefeldioxid pro Kopf der Bevölkerung

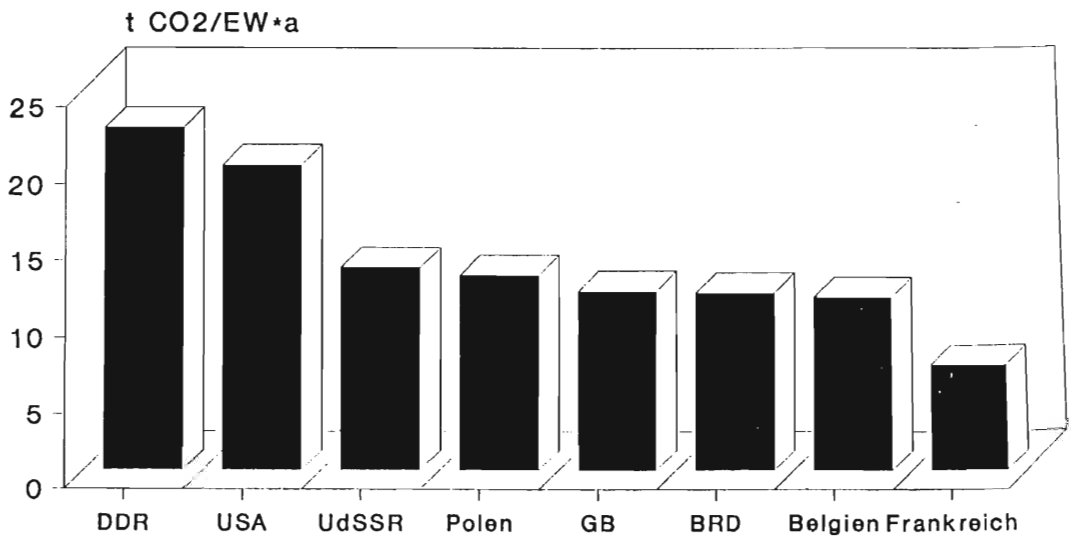


UfU/ÖKO-Institut 6/90


 Unabhängiges Institut  
**UfU**  
 für Umweltfragen

Abb. 18

## Spezifische Emissionen Kohlendioxid pro Kopf der Bevölkerung



UfU/ÖKO-Institut 6/90


 Unabhängiges Institut  
**UfU**  
 für Umweltfragen

### III. Einschätzung und Beurteilung der geplanten energiewirtschaftlichen Projekte und Kooperation

#### 1. Übergreifende Beurteilung der geplanten energiewirtschaftlichen Kooperationen

Die geplanten energiewirtschaftlichen Kooperationsvorhaben müssen vor dem Hintergrund der mit der Energieversorgung verbundenen globalen Probleme betrachtet werden . . . Die Enquete-Kommission hat aufgrund dieser Probleme beschlossen, daß innerhalb des Bundesgebiets die CO<sub>2</sub>-Emissionen bis zum Jahr 2005 um (mindestens) 30 % reduziert werden müssen. In absoluten Zahlen bedeutet dies eine Reduktion von derzeit ca. 720 Mio. t innerhalb von 15 Jahren um rund 220 Mio. t.

Unterstellt man für die DDR das gleiche Reduktionsziel, so müssen dort die CO<sub>2</sub>-Emissionen von rund 350 Mio. t um rund 105 Mio. t reduziert werden. Zusammen muß also auf dem Gebiet der BRD und der DDR eine CO<sub>2</sub>-Emissionseinsparung in Höhe von mindestens 325 Mio. t bis zum Jahr 2005 erfolgen, was über 90 % der CO<sub>2</sub>-Emissionen der DDR ausmachen würde. Dies sollen all diejenigen beachten, die heute eine alleinige Konzentration der Sanierungsbemühungen auf die DDR-Energiewirtschaft mit dem Argument fordern, daß dort mit jeder investierten Mark mehr an CO<sub>2</sub> eingespart werden kann als in der BRD.

Neben dem Klimaproblem besteht weiterhin das große Gefährdungspotential durch die Atomindustrie, insbesondere das Unfallrisiko bei Atomkraftwerken sowie das ungelöste Atommüllproblem. Aufgrund dieses großen Gefährdungspotentials ist der Ausstieg aus der Atomenergie in der DDR und der BRD unabdingbar.

Zwei wesentliche Punkte resultieren aus den CO<sub>2</sub>-Reduktionsanforderungen und aus der Notwendigkeit des Ausstiegs aus der Atomenergie:

1. Die Konzentration auf die Sanierung der DDR-Energiewirtschaft reicht bei weitem nicht aus, um die notwendigen CO<sub>2</sub>-Reduktionsziele innerhalb der BRD und der DDR bis zum Jahr 2005 zu realisieren, unter gleichzeitiger Abschaltung aller Atomkraftwerke in beiden Ländern.
2. Die Energiewirtschaft der BRD ist bei weitem nicht so vorbildlich wie es heute immer wieder von interessierter Seite dargestellt wird. Es existieren heute in der BRD Potentiale der rationellen Energienutzung in einer Größenordnung bis zu 90 % des heutigen Energieverbrauchs in verschiedenen Verbrauchssektoren, deren Ausschöpfung durch die vorhandenen Strukturen be- bzw. verhindert werden.

Allein aufgrund dieser beiden Punkte kann festgestellt werden, daß die Mehrzahl der geplanten Projekte nicht den Anforderungen einer notwendigen globalen Risikominimierung entsprechen. Der Ersatz von alten, ineffizienten Kraftwerken durch neue moderne Anlagen stellt zwar eine Reduzierung der Schadstoffemissionen dar, beinhaltet aber nicht die

Ausschöpfung der möglichen Reduktionspotentiale. Mit dem geplanten Bau von großen Braunkohle- und Atomkraftwerken wird die Errichtung von KWK-Anlagen behindert. Durch den Ersatz von Braunkohlestrom durch Atomstrom findet eine qualitative sowie quantitative Risikoverlagerung statt.

#### 2. Auswirkungen im Gebiet der DDR

Die heute von der Bundesregierung mitbetriebenen Projekte und „Kooperationsvorhaben“ sind in der überwiegenden Mehrzahl versorgungsorientierte Maßnahmen. Sie konzentrieren sich auf die Verbesserung der Angebotstechnologien wie Kraftwerke, Erdgasleitungen und Energieträgersubstitution, beinhalten aber keine Umorientierung auf die möglichst optimale Bereitstellung von Energiedienstleistungen.

Der Bau von neuen Großkraftwerken zur Stromerzeugung, die Nachrüstung von bestehenden Anlagen mit Rauchgasreinigungsanlagen, die teilweise Substituierung von Braunkohle durch Steinkohle, Erdgas und Erdöl erbringen zwar eine teilweise Entlastung, schaffen aber an anderer Stelle, meist außerhalb der DDR, wiederum neue Probleme.

Durch die geplante Privatisierung der Energiewirtschaft und der Machtübernahme der bundesdeutschen Elektrizitätswirtschaft (RWE, PreußenElektra und Bayernwerk) würde eine ineffiziente Mangelwirtschaft durch eine technologisch zwar effizienteres, aber strukturell gleichermaßen ineffizientes Energiesystem abgelöst werden. Was von den EVU geplant wird, ist der Austausch einer zentralistischen staatlichen Planwirtschaft durch eine ebenfalls zentralistische bzw. hochmonopolisierte privatwirtschaftliche Planwirtschaft unter weitgehendem Ausschluß der Öffentlichkeit.

Insbesondere muß festgestellt werden, daß die Möglichkeiten der rationellen Energienutzung im Anwendungsbereich in keinem der Projekte konkret beinhaltet ist, bzw. in dem geplanten Verbund-Vertrag die Kommunen als Akteure einer fortschrittlichen zukünftigen Energiewirtschaft vollkommen fehlen. Gerade die vorhandene Nah- und Fernwärmeinfrastruktur in der DDR erfordert dezentrale Instanzen, die die Umstellung dieser Systeme auf moderne KWK-Anlagen vorantreiben.

Gerade die planmäßige Mobilisierung der Potentiale der rationellen Energienutzung erfordert eine dezentrale Infrastruktur, die eine horizontale Fächerung aufweist (Querverbund), die nur auf der kommunalen bzw. regionalen Ebene effizient angesiedelt werden kann.

Eine Strategie der rationellen Energienutzung hat den Vorteil, daß die heimische Energiequelle Braunkohle durch die heimische „Energiequelle“ rationelle Energienutzung ersetzt würde, was insbesondere bei der Schaffung von neuen Arbeitsplätzen von Bedeutung ist. In einer detaillierten Untersuchung am Beispiel der Stadt Bremen konnte nachgewiesen werden, daß eine Strategie der rationellen Energienutzung im regionalen Rahmen mehr Arbeitsplätze schafft als eine versorgungsorientierte Strategie [BEB 1989].

Ein weiterer negativer Aspekt der derzeit geplanten Übernahme besteht darin, daß nur die profitversprechenden Anlagen und Systeme übernommen werden, die gesamte Altlastensanierung aber auf die öffentlichen Hände abgewälzt wird. Diese Trennung der Aufgabengebiete wird besonders auch für die Kommunen zu negativen Auswirkungen führen, da diese in vielen Bereichen (öffentlicher Nahverkehr, Wasserversorgung etc.) die Infrastruktur erneuern müssen. Eine Verbindung der verschiedenen kommunalen Aufgabenbereiche führt zu einer Verbesserung der Infrastruktur und der Finanzierungsmöglichkeiten. Allerdings muß gewährleistet werden, daß hierdurch nicht ein Zwang zum Mehrabsatz im Energiesektor geschaffen wird. Eine entsprechende Gestaltung der kommunalen Finanzierungsmöglichkeiten können hierfür den notwendigen Rahmen schaffen.

### 3. Auswirkungen der geplanten Projekte auf die Bundesrepublik Deutschland

Durch die Übertragung der energiewirtschaftlichen Strukturen der BRD auf die DDR erfolgt eine weitere Zementierung dieser Strukturen. Insbesondere würde die Übernahme der Stromversorgung der DDR durch die Verbund-EVU eine weitere Machtkonzentration darstellen, die durch keine demokratische Instanz mehr kontrollierbar wäre. Drei EVU würden dann rund 60 Mio. Menschen mit elektrischem Strom direkt oder indirekt versorgen, wobei auf der Erzeugungsseite eine noch stärkere Konzentration vorherrschen würde. Heute verfügt das Bayernwerk, das RWE und die PreussenElektra bereits über eine Kraftwerkskapazität in Höhe von fast 60 000 MW. Nach der Übernahme würde die Kapazität auf über 80 000 MW ansteigen.

Ein weiterer wesentlicher Aspekt ist darin zu sehen, daß durch die geplanten Stromlieferungen in die DDR ab 1992/93 die Möglichkeit des sofortigen Ausstiegs aus der Atomenergie in der BRD nicht mehr gegeben wäre.

Sind die bundesdeutschen EVU erst einmal entsprechende Lieferverpflichtungen eingegangen, so müssen diese auch erfüllt werden, da diese entsprechende Investitionsentscheidungen in der DDR zur Folge haben. Durch die geplanten Stromlieferungen werden in der DDR Kraftwerke vorzeitig stillgelegt, bzw. werden die Neubaubeschlüsse entsprechend angepaßt. Die derzeit aufgrund der vorhandenen Überkapazitäten und der schnell realisierbaren Investitionsmöglichkeiten in KWK-Anlagen bestehenden Ausstiegsmöglichkeit in der BRD und der DDR würde hierdurch zu nichte gemacht.

## IV. Ausgangspunkte für eine Kooperation zur Umsetzung der Energiewende

### 1. Vorbemerkung

In diesem Kapitel sollen zunächst die Potentiale der kommunalen Energiequellen umrissen werden: Hierbei werden die Bereiche Einsparen, Kraft-Wärme-

Kopplung und regenerative Energiequellen betrachtet.

In einem weiteren Abschnitt wird die Notwendigkeit einer kommunalen Energieversorgung begründet, die derzeitigen rechtlichen Rahmenbedingungen dargelegt und Ansätze zur Unterstützung der kommunalen Energieversorgung durch konkrete Maßnahmen sowie eine Verbesserung der Rahmenbedingungen sowohl eine Verbesserung der Rahmenbedingungen gefordert.

## 2. Einsparpotentiale

### 2.1 Einsparpotentiale bei der Stromerzeugung

Die Einsparpotentiale bei der Stromerzeugung lassen sich folgendermaßen gliedern:

- (1) Einsparungen durch die Veränderung der Energieträgerstruktur für die Stromerzeugung.
- (2) Einsparungen durch die Modernisierung oder den Ersatz von Kraftwerken durch Neubau.
- (3) Einsparungen durch die Verringerung der Netzverluste.

zu (1)

Der verstärkte Einsatz von Erdgas besonders auf dem Wärmemarkt und die dadurch entfallende Braunkohleförderung bringt erhebliche Struktureffekte auf dem Stromsektor mit sich. Wie in bereits beschrieben, werden etwa 11,3 % des Nettoverbrauchs an Elektroenergie in Anlagen der Energiewirtschaft (Tagebaue, Brikkettfabriken etc.) umgesetzt. Im Jahre 1988 entsprach dieser Anteil einer Menge von etwa 11 TWh. Bei einer jährlichen Kraftwerksauslastung von 6000 Stunden entspricht dies einer installierten Kraftwerksleistung von 1 800 MW!

Mit der zu erwartenden Senkung des Braunkohleabbaus und einer Einschränkung der Brikkettproduktion werden erhebliche Mengen an Elektroenergie frei. Dabei werden besonders die Tagebaue und Anlagen mit den schlechtesten Leistungsparametern außer Betrieb genommen werden. Setzt man die Senkung der Braunkohleförderung mit etwa 30 % an, so ergibt sich die Einsparung, einer installierten Leistung von über 500 MW. Die Einsparung basiert auf der Annahme, daß mit der Senkung des Braunkohleabbaus um 30 Prozent der Stromverbrauch in den energierzeugenden Betrieben um den gleichen Anteil abnimmt.

zu (2)

Durch die starken ökologischen Belastungen durch Tagebaue, Kraftwerke und andere Verarbeitungsbetriebe (z. B. Brikkettfabriken) wird man einen Teil der verschlissenen Anlagen nicht mehr kostengünstig rekonstruieren können.

Da die Rohbraunkohle auch auf absehbare Zeit ein bedeutendes Standbein der Elektrizitätswirtschaft bleiben wird, besteht die Möglichkeit, Altanlagen durch Neubauten mit effektiven Entschwefelungs- und Entstaubungsanlagen sowie Wirkungsgraden im



Bereich des internationalen Höchststandes (Braunkohlenkraftwerke im Bereich von mindesten 38 %) zu ersetzen.

Zum einen können dadurch Entlastungen der Umwelt realisiert werden, zum anderen werden damit bedeutende Effizienzerhöhungen möglich.

Da gesicherte Daten über die wirtschaftlichen Parameter von Kraftwerksneubauten derzeit nicht verfügbar sind können die Effekte nicht quantifiziert werden.

Ein Denkmodell zeigt jedoch die Größenordnungen:

Wird ein Kraftwerksblock mit einem Wirkungsgrad von 25 % durch ein hochmodernes Braunkohlenkraftwerk mit einem Nettowirkungsgrad von 38 % ersetzt, so werden mit der Verbrennung der gleichen Menge Braunkohle 52 % Strom zusätzlich produziert. Daraus folgt umgekehrt, daß bei der selben Menge Stromerzeugung die CO<sub>2</sub>-Emissionen um rund 34 % reduziert werden können.

zu (3)

Werden Stromerzeugungsanlagen entweder als Kraftwerke (auf Gas- oder Steinkohlebasis) in geringerer Entfernung zu den Abnehmern (z. B. Raum Rostock) neu gebaut oder als dezentrale wärme-kraft-gekoppelte Anlagen errichtet, so können die Übertragungs-

verluste in den Verteilungsnetzen verringert werden.

Weiterhin kann durch die Rekonstruktion des Übertragungsnetzes und den Einbau dezentraler Blindleistungs-Kompensationsanlagen Netzverluste beträchtlich gesenkt werden.

Setzt man eine Senkung der Übertragungsverluste von derzeit 8 Terawattstunden (7,5 %) auf 5,3 TWh (Übertragungsverluste 5 Prozent, zum Vergleich: BRD etwa 3,7 %), so entspricht dies wieder einer Einsparung von 450 MW an installierter elektrischer Leistung.

## 2.2 Einsparpotentiale Stromanwendung

### 2.2.1 Industrie

Das größte Einsparpotential an Strom ist im Bereich der energieintensiven Industriezweige zu finden.

Das hier zu erschließende Einsparpotential soll an einigen Beispielen skizziert werden.

Im folgenden werden Verbrauchswerte für die Produktion ausgewählter energieintensiver Produkte angegeben [RIESNER 1985 S.87] [ZFK 1989 S.7] [STATISTISCHES JAHRBUCH 1989]:

Tabelle 1

Produktion energieintensiver Güter

Produkt	Durchschnitt	Bestwerte		Produktion jährlich [1 000 t]
		DDR	DDR International	
		[kWh/t]	[kWh/t]	
Zement .....	110	64	62	11 988
Elektrostahl .....	725	700	520	2 416
Reinaluminium .....	15 500	15 000	13 500	60

Blieben alle Produktionslinien bestehen und würden auf die internationalen Bestwerte rekonstruiert so ergeben sich folgende Stromeinsparungen:

Aluminium	120 GWh/a
Elektrostahl	495 GWh/a
Zement	551 GWh/a.

In Summe errechnet sich eine einzusparende Kraftwerksleistung von fast 200 MW.

Unter den gegebenen Verhältnissen in der internationalen Arbeitsteilung dürfte es jedoch fraglich sein, ob der Aufbau neuer Kapazitäten oder die kostenaufwendige Rekonstruktion der Anlagen ökonomisch sinnvoll ist.

Gleichzeitig verursachen viele der veralteten Anlagen ökologische Schäden beträchtlichen Ausmaßes (z. B. die Aluminiumherstellung).

Der Verlagerung der entsprechenden Produktionslinien darf auf keinen Fall durch besonders niedrige Strompreise für die Großabnehmer im Bereich der energieintensiven Industrie entgegnet werden (wie in der BRD an einigen Standorten der Chemieindustrie und Aluminiumherstellung praktiziert).

Im Bereich der Industrie wird der größte Einzelverbraucher durch die Karbidherstellung gestellt. Jährlich werden in der DDR 4,0 TWh für die Herstellung dieses international durch andere Verfahren substituierten Stoffs aufgewandt [ZFK 1989 S.8]. Dies entspricht einer Kraftwerksleistung von mehr als 600 MW. Allein aus Gründen der ökologischen Verträglichkeit wird dieses Verfahren in der nächsten Zeit aufgegeben werden.

Der größte Teil des elektrischen Stroms wird durch elektrische Antriebsmotoren in Anspruch genommen.

Die Angaben über die Größe dieses Anteils schwanken zwischen 40 und 45 % [MICHALKE 1986] [ZEISBERG 1988]. Bezogen auf den Nettostromverbrauch im Jahre 1988 ergibt sich daraus eine elektrische Arbeit von 47,3 bis 53,2 TWh. Zu etwa 90 % werden Asynchronmotoren als elektrische Antriebe eingesetzt. Durch den Einsatz von Leistungselektronik (drehzahlvariable Steuerung der Motoren), verbunden mit einer Lastanpassung können bei

Drehstrommotoren 10 . . . 30 %  
(in Einzelfällen bis zu 85 %)  
und bei  
Gleichstrommotoren 15 %

des benötigten elektrischen Stroms eingespart werden [ZEISBERG 1988]. Diese Angaben ordnen sich in die internationalen Angaben von 10 . . . 40 % [BALDWIN 1989 S. 38] bzw. 35 % [NIELSEN 1989 S. 46] ein.

Die richtige Auslegung und Steuerung der Antriebe entsprechend dem tatsächlichen Lastgang sind ein weiterer Sparfaktor. So waren zum Beispiel in der chemischen Industrie die Antriebe durchschnittlich nur zu 60 % ausgelastet, was natürlich entsprechende Wirkungsgradverschlechterungen und damit einen höheren Stromverbrauch nach sich zieht.

Angaben über Verteilung der Leistungsklassen von elektrischen Antrieben liegen derzeit nicht vor. Bei der zu erwartenden Modernisierungsphase in der DDR muß dem Einsatz von dem Lastgang angepaßten (auch Leerlaufverluste) und regelbaren Antrieben ein starkes Augenmerk gewidmet werden.

Setzt man die Schätzung an, daß etwa 70 % der durch elektrische Motoren gebundenen Energie mit Leistungselektronik ausgerüstet werden und damit durchschnittlich 30 % Energieeinsparungen realisiert werden könnten, so ergibt sich eine Einsparung von ca. 11 TWh.

Diese Leistung entspricht beim Ansatz eines modernen Kraftwerks einer installierten Leistung von etwa 1 800 Megawatt. Die Größe des Sparpotentials hängt in entscheidendem Maße davon ab, wie groß der Anteil der nachzurüstenden Motoren sein kann. Im wesentlichen sind die Differenzen bei der Angabe dieses Potentials in den verschiedenen Studien auf diese Annahme zurückzuführen.

Tabelle 3

#### Energieaufwand für verschiedene Beleuchtungsarten

	1980		1985	
	Licht	Energie	Licht	Energie
	[%]	[%]	[%]	[%]
Glühlampen . . . . .	9	29	9	32
Leuchtstofflampen . . . . .	62	46	65	51
Hochdrucklampen . . . . .	29	25	26	17

Weitere Sparpotentiale sind durch leistungselektronische Steuerungen bei elektrothermischen Verfahren (25 %) und bei der Industrie- und Bahnstromversorgung (5 %) erschließbar [ZEISBERG 1988].

#### 2.2.2 Beleuchtung

Mit einem Anteil von 10 bis 12 % am jährlichen Elektroenergieverbrauch (12,84 TWh im Jahre 1989) stellt die elektrische Beleuchtung einen wichtigen Feld für die Stromeinsparung dar.

Dabei ist der Anteil am gesamten Stromverbrauch im Bereich der Haushalte mit etwa 20 % wesentlich höher als in den produzierenden Bereichen (Industrie, Bauwesen, Landwirtschaft, Verkehr: 10 %). Setzt man die Sparpotentiale nach [Nielsen 1989 S. 46] mit 74 % im Haushaltsbereich, 55 % in der Industrie und etwa 50 % im kommunalen und gewerblichen Sektor an, so ist für das Jahr 1989 ein Sparpotential nach Tab. 5.2 erschließbar.

Tabelle 2

#### Stromeinsparpotentiale im Beleuchtungssektor

Sektor	Verbrauch	Sparpotential
	[TWh]	[TWh]
Industrie, Bauwesen, Landwirtschaft, Verkehr . . . . .	7,37	3,7
Haushalte . . . . .	3,53	2,6
Sonstige . . . . .	1,94	1,0
Gesamt . . . . .	12,84	7,3

Dies würde einer installierten Kraftwerkskapazität von etwa 1 200 MW entsprechen.

Am folgenden Beispiel soll exemplarisch gezeigt werden, wie dieses Potential erschließbar wäre.

Die folgende Tabelle zeigt die Verteilung der Lichterzeugung und des Energieverbrauchs für die Beleuchtung dar [MÜLLER 1989]:

Diese Verteilung zeigt deutlich, daß eine der wichtigsten Aufgaben bei der Stromeinsparung im Beleuchtungssektor in der Ablösung der Glühlampen besteht. Die internationalen Erfahrungen besagen jedoch auch, daß im Bereich der Leuchtstofflampen (Reflektoren, elektronische Vorschaltgeräte etc.) noch beträchtliche Sparpotentiale zu erschließen sind.

In [MÜLLER 1989] wird beim Einsatz von Glühlampen für eine Brenndauer von ca. 2000 Stunden pro Jahr ein Anteil von 10 bis 20% der Brennstellen angegeben. Für die Brenndauer von ca. 700 Stunden im Jahr wird der Anteil auf etwa 80 bis 90% geschätzt.

Damit ergibt sich ein Energieverbrauch durch Glühlampen von etwa 2,48 TWh im 2000-h- und von 0,84 TWh im 700-h-Nutzungsbereich.

Gelingt es kurz bis mittelfristig, 50% der Glühlampen im 2000-h-Bereich zu 50% durch Kompaktlampen (Stromverbrauch ca. 20% bei gleicher Lichtausbeute) zu ersetzen, so ergibt sich eine Stromeinsparung von

rund 1 TWh. Werden zusätzlich noch 25% der Glühlampen im 200-h-Betriebsbereich ausgewechselt, so ergibt sich insgesamt eine Elektroenergieeinsparung von ca. 1,16 TWh. Dies entspricht einer Kraftwerksleistung von etwa 190 MW.

**2.2.3 Haushalte**

Die nachfolgenden Ausführungen sollen deutlich machen, daß einerseits im Bereich der Haushalte erhebliche Einsparpotentiale zu erwarten sind, andererseits aber durch die Neuanschaffung von bisher kaum oder nicht vorhanden Geräten (Spülmaschinen, Wäschetrockner) ein Strommehrverbrauch entsteht.

Werden die Ausstattungsgrade an elektrischen Haushaltgeräten sowie der spezifische Verbrauch ausgewertet, so ergibt sich auf der Grundlage verschiedener Studien das folgende Bild [TAUTENHAHN 1989; LASCHKE 1989; BEB 1989; EBÖK 1986]

Tabelle 4

**Ausstattung an elektrischen Haushaltsgeräten und spezifischer Verbrauch**

Geräteausstattung	DDR	Bundesrepublik Deutschland	Spezieller Verbrauch [kWh/Gerät · a]			
			DDR 1986	DDR 1989	ebök 1986	BEB 1989
Waschmaschinen . . . . .	99	99	700	740	280	297
Gefriergeräte . . . . .	43	77	450	525	550	572
Kühlschränke . . . . .	99	82	90	300	370	420
Fernsehgeräte . . . . .	96	98	80	k. A.	130	k. A.
davon Farbfernsehgeräte	52	94				
Rundfunkgeräte . . . . .	100	k. A.	30	k. A.	k. A.	k. A.
Kaffeemaschinen . . . . .	77	k. A.	120	k. A.	k. A.	k. A.
Spülmaschine . . . . .	1	40	k. A.	k. A.	580	567

Für die Gerätegruppen Waschmaschinen, Gefriergeräte und Fernsehgeräte ergibt sich für die DDR ein relativ konsistentes Bild. Die große Differenz im Verbrauch der Kühlschränke zwischen den beiden DDR-Studien läßt sich nicht erklären. Der Vergleich mit den Zahlen aus der BRD weist jedoch darauf hin, daß ein Jahresverbrauch von 300 kWh im Bereich des Wahrscheinlichen liegt.

Aus diesen Angaben läßt sich eine Referenzliste für die DDR bilden:

Tabelle 5

**Referenzwerte für den Verbrauch der Haushaltsgeräte in der DDR**

Gerät	Spez. Verbrauch [kWh/Gerät · a] Referenz DDR
Waschmaschinen . . . . .	740
Gefriergeräte . . . . .	525
Kühlschränke . . . . .	300
Fernsehgeräte . . . . .	80
Rundfunkgeräte . . . . .	30
Kaffeemaschinen . . . . .	120
Spülmaschine . . . . .	0
Wäschetrockner . . . . .	0

Diese Referenzliste ist vergleichbar mit einer Liste der marktbesten Geräte bzw. der zu erwartenden Bestgeräte:

Tabelle 6

### Einsparpotentiale bei Haushaltsgeräten

Gerät	Spez. Verbrauch und Einsparung zu DDR „Referenz“ [kWh/Gerät · a und %]							
	Bremen 1989		ebök 1986 „möglich“	DDR 1989 „neu“				
	Markt	Bestgerät						
Waschmaschinen . . . . .	208	(72 %)	172	(77 %)	67	(91 %)	563	(24 %)
Gefriergeräte . . . . .	326	(38 %)	196	(63 %)	96	(82 %)	307	(42 %)
Kühlschränke . . . . .	244	(19 %)	199	(34 %)	81	(73 %)	266	(11 %)
Fernsehgeräte . . . . .	k. A.		k. A.		22	(73 %)	k. A.	
Rundfunkgeräte . . . . .	k. A.		k. A.		k. A.		k. A.	
Kaffeemaschinen . . . . .	k. A.		k. A.		k. A.		k. A.	
Spülmaschine . . . . .	414		356		110		k. A.	
Wäschetrockner . . . . .	402		348		173		k. A.	

Die Spalte „Markt“ bezeichnet dabei die durchschnittlichen Verbräuche der auf dem Markt befindlichen Geräte und die Spalte „Bestgerät“ die Parameter des marktbesten Gerätes. Die Spalte „möglich“ weist die Einführung der technisch zu erwartenden Geräte aus, die mit einer Verhaltensänderung der Nutzer verbunden ist. Unter die Kategorie „neu“ wurden die Geräte eingeordnet, die in der DDR ins Angebot kommen sollten.

Aus diesen Betrachtungen lassen sich drei Schwerpunkte ableiten.

Erstens liegt ein beträchtliches Einsparpotential im schnellen Ersatz der auch für die DDR „klassischen“ Haushaltsgroßgeräte wie Kühl- und Gefrierschränke sowie Waschmaschinen durch energiesparendere Geräte.

Zweitens muß durch entsprechende Aufklärung bzw. die finanzielle Stimulierung im Bereich der „neuen Anwendungen“ (größerer Anteil an Farbfernsehern, Aufkommen von Spülmaschinen und Wäschetrocknern) erreicht werden, daß besonders die marktbesten Geräte zur Anwendung kommen: Bei einer angemessenen Ausstattung von zunächst 10 % der Haushalte in der DDR mit Spülmaschinen ergibt sich eine jährliche Differenz im Stromverbrauch von etwa 36 GWh!

Drittens muß auch für den Haushaltsbereich das Substitutionspotential beachtet werden. Durch den großen Anteil von elektrischen Herden und elektrischen Warmwasserbereitern in der DDR lassen sich hier wesentliche Effekte erzielen.

Im Zuge der Modernisierung von Bausubstanz und Heizungsanlagen können beträchtliche Teile der Herde auf Gas umgestellt bzw. die Warmwasserbereitung an die Heizungssysteme angeschlossen werden.

#### 2.2.4 Modellrechnung

In den vorhergehenden Kapiteln wurden exemplarisch einige Beispiele für die erschließbaren Einsparpotentiale im Wärme- und Strombereich aufgezeigt. Diese Beispiele verdeutlichen für den gesamten Bereich der Energieanwendung große Minderungspotentiale.

Im Folgenden soll versucht werden, am Beispiel des Stromsektors Linien für die zukünftige Entwicklung zu zeichnen. Aufgrund der noch unsicheren Datenlage kann dies nicht als Szenario verstanden werden. Wichtiger ist, die verschiedenen Einflußfaktoren kenntlich zu machen und damit die wichtigen Ansatzpunkte zu benennen.

Einsparungen können erzielt werden durch Effizienzsteigerung des Versorgungssystems, durch Strukturveränderungen des Energieträger-Mix, durch Umstrukturierungen der Industrie, durch Nutzbarmachung technischer Sparpotentiale und durch bewußteres Verhalten der Energieanwender. Diesen Potentialen steht die verbrauchssteigernde Tendenz eines fortlaufenden Wachstums und der damit verbundenen Möglichkeit von Bedarfssteigerungen gegenüber.

Die folgenden Betrachtungen versuchen diese Faktoren für das Gebiet der DDR gegeneinander abzuwägen.

Wie in 2.1 gezeigt wurde, ergibt sich aus den Strukturänderungen im Bereich der Energieträger und der Energieversorgung sowie aus dem Strukturwandel in der Industrie ein beträchtliches Energieeinsparpotential. Um die Größenordnung dieses Potentials abzuschätzen, wird ein Vergleichswert eingeführt. Dieser basiert auf der Annahme, daß die Wertschöpfung der

DDR (Stand 1988) mit der Stromeffizienz der BRD erbracht wird: Wieviel Strom hätte für das 1988 erwirtschaftete Bruttoinlandsprodukt in der DDR aufgebracht werden müssen, wenn die Stromeffizienz der BRD des Jahres 1988 angesetzt würde? Dieser fiktive Strombedarf beläuft sich für den gesamten wertschöpfenden Bereich bei einem Bruttoinlandsprodukt der DDR von rund 360 Mrd. DM auf ca. 44 TWh. Setzt man weiterhin an, daß der Bedarf für die DDR-Haushalte sich an den der BRD angleicht, so beträgt der fiktive Verbrauch in den Haushalten für das Jahr 1988 26 TWh.

In der Summe ergibt sich für das Jahr 1988 ein fiktiver Bedarf von 70 TWh, für den bei konstanter Effizienz des Umwandlungssystems der BRD etwa 83 TWh elektrischer Strom brutto erzeugt werden müßte.

Bezieht man in diese fiktive Betrachtung die Annahme ein, daß die Produktivität der DDR die der BRD erreicht, ergibt sich ein Bruttoinlandsprodukt von etwa 570 Mrd. DM im Jahr 2000. Mit der Stromeffizienz der BRD ergäbe sich für die Wertschaffung ein Strombedarf von 70 TWh. Zusammen mit dem Haushaltsbedarf ergäbe sich eine Gesamtsumme von 96 TWh, die eine Bruttoerzeugung von 116 TWh nötig machte.

Der wirkliche Strombedarf wird, abhängig von den Beeinflussungsstrategien, in der von diesen fiktiven Parametern ausgehenden Bandbreite verlaufen. Im Folgenden werden ausschließlich lineare Verknüpfungen angesetzt. Diese repräsentieren zwar keineswegs die wirkliche Dynamik, machen aber die Zusammenhänge deutlich.

Folgende Parameter wirken weiterhin auf die Entwicklung:

1. Die reinen Stromanwendungspotentiale (Motore, Beleuchtung etc. – vgl. 2.2) liegen in den Größenordnungen, die auch international beschrieben werden. Die damit mögliche Erhöhung der Stromeffizienz wird dadurch interessant, daß im Zuge der Modernisierungswelle in der DDR die Chance besteht, bei der Einrichtung der Anlagen die energetisch fortgeschrittensten Anlagen zu installieren und damit schnell Potentiale der rationellen Energieanwendung zu erschließen. Die Erhöhung der Stromeffizienz bei der Wertschaffung wird in einem Szenario für Schweden [BODLUND 1989 S.911] mit 0,2 % im Jahr („frozen-efficiency“) über 1,5 % („reference“), 2,7 % („efficiency“), 3,0 % („high efficiency“) bis zu 3,5 % („advanced technology“) angegeben. Eine dänische Arbeit [DENMARK 1988 S.26] beziffert das (sofort erschließbare) Potential „saving behaviour and technological conservation“ auf etwa 40 %.
2. Die angespannte soziale Lage in der DDR und die Struktur der Energieanwendung werden bewirken, daß das in der BRD erreichte Niveau des Haus-

haltsverbrauchs an Elektroenergie nicht erreicht wird. So wird die elektrische Heizung in der DDR nicht das Ausmaß der BRD erreichen. Durch entsprechende Preisgestaltung und finanzielle Anreize bzw. Informationsarbeit ist es möglich, daß bei der Anschaffung von neuen Geräten niedrigverbrauchende angeschafft werden und so der zu erwartende Mehrverbrauch in den Haushalten abgedämpft werden kann.

Durch die gerätetechnische Sättigung und die technische Weiterentwicklung sowie durch bewußteres Verbraucherverhalten ist für den Haushaltsbereich langfristig wieder eine Bedarfssenkung anzusetzen.

Wird in der DDR eine Effizienzstrategie durchgeführt, dann kann die Stromerzeugung bis zum Jahr 2000 auf rund 96 TWh reduziert werden (Abb. 1). Diese Modellrechnung geht von den folgenden Annahmen aus:

- Die DDR erreicht bis zum Jahr 2000 die Produktivität der BRD, die bis dahin ihr Bruttoinlandsprodukt um jährlich 2,4 % gesteigert hat (d. h. Wachstumsraten von jährlich 7 % zum Stand von 1988!).
- Die Bevölkerungszahl der DDR bleibt konstant.
- Der Verbrauch in den Haushalten der DDR hat sich bis zum Jahr 2000 von 1048 auf 1450 kWh (Variante A) bzw. 1250 kWh (Variante B) je Einwohner erhöht (BRD 1988: 1585 kWh).
- Die Erhöhung der Stromeffizienz im Bezug auf die Wertschaffung wird im Bereich von 0 bis 4 % variiert.
- Die angesetzte Effizienz des Versorgungssystems der BRD bleibt konstant.

Die Modellrechnung zeigt deutlich, daß bei einer sehr guten Ausgangsposition für die Einführung stromsparender Technologien, sehr ehrgeizigen wirtschaftlichen Steigerungsraten und steigendem Verbrauch in den Haushalten die erforderliche Bruttostromerzeugung weit unter dem Stand von 1988 gehalten werden kann und die fortschreibende Prognose nach [IFE 1990b] wesentlich zu hohe Verbrauchsdaten ansetzt.

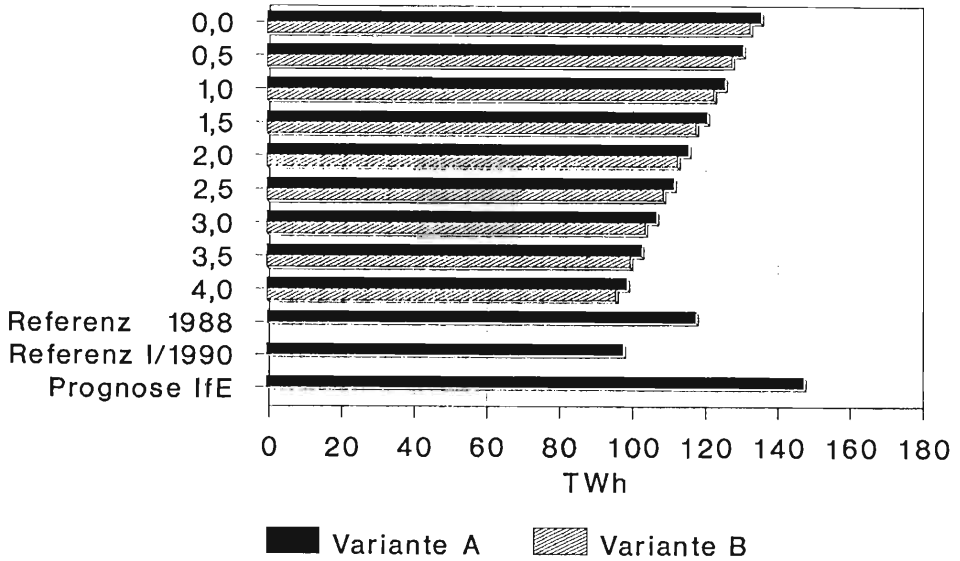
Die Effizienzstrategie wirkt sich auch entsprechend auf die Entwicklung der Jahreshöchstlast aus, und den zur Abdeckung erforderlichen Kraftwerkspark.

Die Jahreshöchstlast in der Stromversorgung betrug 1988 17 700 MW. Setzt man eine gleichverlaufende Reduzierung der Höchstlast mit dem Stromverbrauch an, so reduziert sich die Jahreshöchstlast auf ca. 14 000 MW bis zum Jahr 2000, was den derzeitigen Verhältnissen in der BRD entsprechen würde. Dabei ist zu berücksichtigen, daß eine darüberhinausgehende Lastoptimierung noch eine weitere Höchstlastreduzierung ermöglichen würde.

Abb. 1

# Modellrechnung Bruttostromerzeugung im Jahr 2000

Intensitätserh. [%/a]



Bei einem unterstellten Reservefaktor von 15% (Obergrenze) würde dies eine notwendige Kraftwerksleistung von rund 16 000 MW erforderlich machen. Von der heute installierten Kraftwerksleistung in Höhe von 24 000 MW könnten also bis zum Jahr 2000 rund 8 000 MW eingespart werden (Abb. 2). Erste Abschätzungen des bis zum Jahr 2000 mobilisierbaren KWK-Potentials, insbesondere auch im industriellen Sektor, liegen bei einer elektrischen Leistung zwischen 7 500 MW bis 9 000 MW.

Dem Szenario entsprechend reduziert sich damit der Anteil der Kraftwerke mit Kondensationsstromerzeugung

auf einen Wert zwischen 7 000 und 8 500 MW. Dies verdeutlicht, daß nicht der Zubau von zentralen Großkraftwerken zur Diskussion steht, sondern der Bau von dezentralen KWK-Anlagen.

## 2.3 Wärme

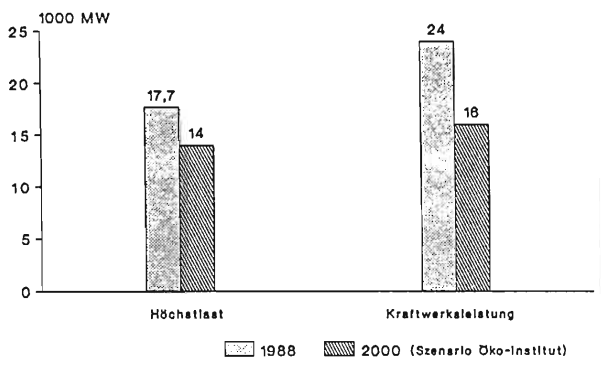
77,3% der Nutzenergie wird in der DDR als Wärmeenergie eingesetzt. Diese läßt sich trennen nach Raumwärme (38,3%) und Prozeßwärme (39,0%). Im Bezug auf die Raumwärme ist zwischen privaten, kommunalen und industriellen Bauten zu unterscheiden.

Für den Bereich der industriellen Wärmeprozesse sind vor allem die Industrieöfen von Bedeutung. In [DENGEL 1983] wurde für den Zeitraum von 1980 bis 1985 für 21 000 Industrieöfen ein erschließbares Sparpotential von 243 PJ angegeben. Zum Raumwärmeverbrauch im Industriebau schrieb [MEHLIG 1990]: „Beispielsweise werden die – ökonomisch keinesfalls optimalen – Richtwerte der Bauakademie von 85 GJ/100m<sup>2</sup> Bruttogeschossfläche im Industriebau derzeit in der Praxis noch um 100% überschritten“

Dieser Hinweis auf die großen Sparpotentiale beim Raumwärmebedarf in Industriebauten wird durch die dringliche Rekonstruktion vieler Industriebauten verstärkt. So ergab eine Untersuchung [KREHL 1989], daß sich, bezogen auf die Bruttofläche

Abb. 2

## Entwicklung der Höchstlast und Kraftwerksleistung in der DDR



5,0% der Bauten in sehr gutem Zustand,  
59,6% der Bauten in gutem Zustand,  
35,0% der Bauten in einem durch schwere Schäden  
beeinträchtigten Zustand und  
0,4% der Bauten in unbrauchbarem Zustand befin-  
den.

Damit sind in den nächsten Jahren etwa 40% zu re-  
konstruieren bzw. durch Neubau zu ersetzen!

Im privaten Wohnbereich ist die Raumheizung durch

- die Neugestaltung der Preise besonders im Fern-  
wärmebereich,
- verstärkte Wärmedämmung bei Rekonstruktion  
und Neubau,
- den Einbau effektiver Anlagen der Technischen  
Gebäudeausrüstung (Regel-, Steuereinrichtun-  
gen),
- verbesserte Standards, Projektierungs- und Be-  
rechnungsverfahren

beeinflußbar.

In der Abb. 3 wird ein Beispiel gezeigt, bei dem allein  
durch die verbrauchsabhängige Abrechnung der Hei-

zungskosten der Energiebedarf für die Raumheizung  
um über 30% gesenkt wird [RIESNER 1990].

Ein Experiment im Neubaugebiet Leipzig-Grünau  
führte zu Senkungen des Fernwärmeverbrauchs von  
15,6%, der Verbrauch von zentral bereitgestelltem  
Warmwasser sank um 26% [ÖFI 1989].

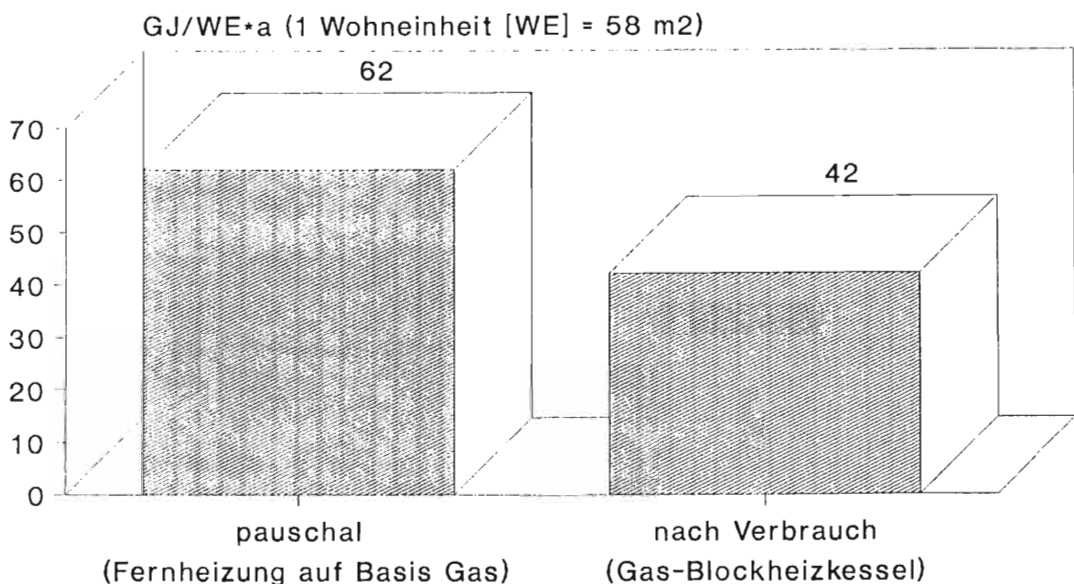
Bei Installation der entsprechenden Meß- und Rege-  
lungseinrichtungen dürften sich innerhalb der näch-  
sten 10 Jahre allein durch die verbrauchsabhängige  
Abrechnung des Raumwärmebedarfs besonders in  
fernbeheizten Wohnungen Einsparungen von 20 bis  
30% ergeben.

Gestützt wird diese Annahme durch die immer wieder  
beschriebene Erkenntnis, daß sich durch den bewuß-  
ten und sparsamen Umgang mit Energie oft größere  
Einsparungen ergeben als durch technische Maßnah-  
men erzielbar sind.

Im Zuge des in den nächsten Jahren notwendigen  
Modernisierungsprogramms im Wohnungswesen  
sind Energieeinsparungen durch verbesserte  
Wärmedämmung in Verbindung mit modernen Heiz-  
systemen von über 50% erreichbar [TUD 1990].

Abb. 3

## Gebrauchsenergieverbrauch Raumwärme nach Abrechnungsarten



### 3. Kraft-Wärme-Kopplung

#### 3.1 Umrüstung von Heizwerken

Durch stillgelegte Turbinen ist in vielen Heizkraftwerken und Industriekraftwerken der DDR keine Stromerzeugung mehr möglich. Dieses Problem ist so akut, daß es im Forderungskatalog der Ingenieurorganisation (Kammer der Technik) explizit erwähnt wird [TG 1990]:

„Da in vielen Industriekraftwerken und Heizkraftwerken veraltete Turbinen außer Betrieb genommen werden mußten, weil der Turbinenbau der DDR sich außerstande sah, diese wieder instand zu setzen bzw. keine Aufträge erhielt, neue Turbinen als Ersatz zu installieren, sollte eine Renaissance des Turbinenbaus in der DDR angestrebt werden.“

Für neue Anlagen in der „wärmeintensiven“ Klein- und Mittelindustrie wird in [ZRE 1990] ein Potential von 1 000 MW angegeben. Über die Möglichkeit einer Nachrüstung von Heizwerken mit Wärme-Kraft-Kopplung liegen nur Angaben vor, die ein Potential von immerhin mehr als 3 000 MW beziffern.

Aus Braunkohlenkraftwerken in der DDR wird ebenfalls Wärme ausgekoppelt. So werden im Kraftwerk Jänschwalde aus sechs 500-Megawatt-Blöcken je 58,2 MW Fernwärme (insgesamt 349,2 MW) entnommen. Dies sind weniger als 10 % der insgesamt anfallenden Wärme. Aufgrund der ökonomischen Grenzen von Fernwärmeauskopplung aus Großkraftwerken (begrenzte Abnahmekapazitäten, lange Übertragungsleitungen etc.) ist eine hohe Energieausnutzung mit dieser Orientierung nicht zu erreichen.

#### 3.2 BHKW statt Gasheizungen

Für die nächste Zeit wird gerade auf dem Wärmemarkt ein großer Teil der Heizungsanlagen auf den Energieträger Erdgas umgestellt werden. Wird dieses Erdgas nicht direkt verbrannt, sondern in kraft-wärme-gekoppelten Anlagen effizient verwendet, so ist damit ein erhebliches Stromerzeugungspotential erschließbar.

Die folgende Überschlagsrechnung soll die Bedeutung dieses Potentials zeigen:

Werden von der insgesamt veranschlagten Menge von 18 Mrd. Kubikmeter Erdgas 8 Mrd. Kubikmeter in Kraft-Wärme-Anlagen verwendet, so ist bei einem durchschnittlichen thermischen Wirkungsgrad von

60 % und einer Stromkennzahl von 0,5 ein Potential von 23 TWh Strom erschließbar. Dies entspricht einem Fünftel der Bruttostromerzeugung im Jahre 1988! (Die Stromkennzahl bezeichnet das Verhältnis von der elektrischen Leistung zur Wärmeleistung.)

Gerade der Markt für Blockheizkraftwerke wird in der DDR sehr interessant, da viele kommunale Einrichtungen wie z. B. Krankenhäuser noch eigene Braunkohlenheizhäuser besitzen und sich BHKW gerade für solche Abnehmer auf dem Markt der BRD durchgesetzt haben. Auch für Wohngebiete mit hohen Wohndichten sind Blockheizkraftwerke bereits jetzt und unter heutigen Rahmenbedingungen wirtschaftlich.

Auf Grund der zur Zeit günstigen Angebote für die Errichtung von Blockheizkraftwerken ist dies besonders im kommunalen Bereich eine sehr interessante Variante.

#### Ökologische Aspekte einer flächendeckenden Gasversorgung

Ein Beispiel für die Realisierbarkeit solcher Konzepte wird in Dänemark gezeigt, wo der Fernwärmeanteil an der Raumheizung 1987 38,6 % betrug und dieser zu 50 % in kraft-wärme-gekoppelten Anlagen erzeugt wurde.

Wenngleich der nun bekannt gewordene komplette Ausverkauf der Stromversorgung der DDR in der Öffentlichkeit unter Wettbewerbsgesichtspunkten als problematisch eingestuft wird, so werden doch die raschen „Kooperations“-Erfolge der Energiewirtschaft als Beitrag zum Umweltschutz gefeiert. Die Substitution von „schmutzigem“ Braunkohlestrom durch „sauberen“ bundesdeutschen Atomstrom, die schnelle Versorgung der DDR mit dem „sauberen“ Erdgas sowie die Nachrüstung von Braunkohlekraftwerken mit Rauchgasreinigungsanlagen stellen bei einer kurzfristigen Betrachtung einen Fortschritt für die DDR und eine Entlastung für die Umwelt dar.

Im folgenden soll betrachtet werden welche Emissionen bei den geplanten Maßnahmen im Vergleich zu einer Nahwärmeversorgung mit einem Gasturbinen HKW oder einem Gas-BHKW zusätzlich anfallen werden. Hierzu werden die verschiedenen Alternativen gegenübergestellt:

Die Basisdaten für die Emissionen bei der Stromerzeugung sind in Tab. 7 dargestellt. In Tab. 8 sind die Emissionen für SO<sub>2</sub>, NO<sub>x</sub>, Staub und CO<sub>2</sub> für die unterschiedlichen Varianten zusammengestellt.



Tabelle 7

**Emissionsdaten je MWh Strom- bzw. Wärmeleistung (inkl. Prozeßketten)**

	PE [MWh]	SO <sub>2</sub>	NO <sub>x</sub>	Staub	CO <sub>2</sub>
		[kg]			
BrK-DDR .....	4,2	31,2	4,4	1,5	1 663
StK-KW .....	2,8	0,7	0,7	0,3	922
Gas-GT-HKW (brutto) .....	3,6	0,0	1,0	0,1	636
Gas-BHKW (brutto) .....	3,9	0,0	0,9	0,0	700
Gas-Heizung .....	1,5	0,0	0,2	0	260
Öl-Heizung .....	1,4	0,4	0,3	0,0	350

Tabelle 8

**Bilanzen für 1 MWh Strom- und 2 MWh Wärmeerzeugung  
(d. h. Stromkennzahl der HKW = 0,5)**

	PE [MWh]	SO <sub>2</sub>	NO <sub>x</sub>	Staub	CO <sub>2</sub>
		[kg]			
DDR-Kraftwerk plus Öl- oder Gasheizung					
Summe El+Öl .....	6,9	31,9	4,9	1,6	2 364
Summe El+Gas .....	7,1	31,2	4,8	1,5	2 182
BRD-StK-KW plus Öl- oder Gasheizung					
Summe El+Öl .....	5,9	1,5	1,2	0,1	1 623
Summe El+Gas .....	5,7	0,7	1,1	0,1	1 442
Gas-GT-HKW .....	3,6	0,0	1,0	0,1	636
Gas-BHKW .....	3,9	0,0	0,9	0,0	700

In Tab. 9 wird dargelegt, welche Emission gegenüber einem DDR-Braunkohlekraftwerk durch eine Stromerzeugung in einem bundesdeutschen Steinkohlekraftwerk vermieden werden. Gleichzeitig wird unterstellt, daß die Heizungen von Braunkohle-Einzelheizung auf Gas bzw. Heizöl umgestellt werden.

Demnach führt die Substitution für 1 MWh Strom und 2 MWh Wärme zu einer Primärenergieeinsparung von 1,4 MWh, sowie zur Vermeidung von Emissionen in Höhe von 30,4 kg SO<sub>2</sub>, 3,7 kg NO<sub>x</sub> sowie 741 kg CO<sub>2</sub>.

Tabelle 9

**Einsparung beim Ersatz des DDR-KW plus Heizung durch andere Systeme**

	PE [MWh]	SO <sub>2</sub>	NO <sub>x</sub>	Staub	CO <sub>2</sub>
		[kg]			
StK + Öl .....	1,4	30,4	3,7	1,5	741
StK + Gas .....	1,4	30,4	3,7	1,5	741
Gas-GT-HKW vs. Öl .....	3,4	31,9	3,9	1,5	1 728
Gas-GT-HKW vs. Gas .....	3,5	31,2	3,8	1,5	1 546
Gas-BHKW vs. Öl .....	3,0	31,9	4,1	1,5	1 663
Gas-BHKW vs. Gas .....	3,1	31,2	4,0	1,5	1 482

Tabelle 10

**Einsparung beim Ersatz durch KWK-Systeme statt Kohle-KW sowie Gas- oder Ölheizung**

Einsparung	PE [MWh]	SO <sub>2</sub>	NO <sub>x</sub>	Staub	CO <sub>2</sub>
		[kg]			
Gas-GT-HKW vs. Öl .....	2,0	1,5	0,2	0,1	987
Gas-GT-HKW vs. Gas .....	2,2	0,7	0,1	0,0	805
Gas-BHKW vs. Öl .....	1,6	1,5	0,4	0,1	923
Gas-BHKW vs. Gas .....	1,8	0,7	0,3	0,1	741

Bei einer Gas-BHKW-Lösung hingegen würden gegenüber einer reinen Gasversorgung und Strom aus einem Steinkohlekraftwerk mit Rauchgasreinigung rund 3,1 MWh Primärenergie, 31,2 kg SO<sub>2</sub>, 4,0 kg NO<sub>x</sub> sowie 1482 kg CO<sub>2</sub> eingespart.

Die Berechnungen belegen, daß gegenüber der jetzigen Versorgungssituation in der DDR alle Alternativen wesentlich weniger Emissionen bei den Schadstoffen SO<sub>2</sub>, NO<sub>x</sub> und Staub verursachen. Sie belegen weiterhin, daß eine Nahwärmeversorgung über ein Gas-BHKW oder eine Gasturbinen-HKW die sauberste Lösung darstellt. Vor allem bezüglich der Emissionen des klima-wirksamen Kohlendioxids stellen die beiden letzten Varianten die wesentlich günstigeren Varianten dar, die gegenüber einer getrennten Strom- und Wärmeversorgung nur knapp die Hälfte an CO<sub>2</sub> verursachen.

#### 4. Regenerative Energiequellen

##### 4.1 Bedeutung des Einsatzes erneuerbarer Energiequellen in der DDR

Erneuerbare Energiequellen können als einzige Energieträger nachgefragte Energiedienstleistungen umwelt- und ressourcenschonend decken. Ihre Nutzung erfolgt weitgehend schadstofffrei, ihr Potential ist, zumindest menschlichen Zeitmaßstäben entsprechend, unerschöpflich. Umweltschäden, Klimakatastrophe und auch radioaktive Verstrahlung durch einen potentiellen Super-GAU in einem Atomreaktor können nur durch einen Einstieg in eine Sonnenenergiewirtschaft vermieden werden.

Voraussetzung dafür ist allerdings eine Energie-wende auf der Basis von Energieeinsparung und rationeller Energieumwandlung. Nur mit einem auch bedarfsseitig optimierten Versorgungssystem kann die Sonnenenergie ihre Möglichkeiten voll entfalten.

Die erneuerbaren Energiequellen stehen in der augenblicklichen Diskussion über die ökologische Sanierung der Energieversorgung und insbesondere der Stromwirtschaft in der DDR im Hintergrund, obwohl diese aus o. g. genannten Gründen eine große Beachtung erhalten müssen. Dabei geht es heute insbesondere darum, Strukturen zu schaffen, die die Markteinführung der regenerativen Energiequellen unterstützen.

Dieser Abschnitt soll eine Bestandsaufnahme und eine erste grobe Potentialabschätzung leisten. Dies ist

jedoch aufgrund der schlechten Datenlage sehr schwierig. In den letzten zehn Jahren wurden in der DDR lediglich zwei Studien zur Potentialbestimmung der regenerativen Energiequellen in der DDR veröffentlicht.

Die Arbeit von Noack [NOACK 1980 S.21 ff.] stützt sich auf eine Studie des Instituts für Energetik/Zentralstelle für rationelle Energieanwendung aus dem Jahr 1979. Diese Arbeit betrachtet die zukünftige Rolle der regenerativen Energiequellen unter folgender Fragestellung:

„Ist die Energieträger-Bereitstellung für typische Bedarfsträger durch unkonventionelle Verfahren [= regenerative Energiequellen] ökonomischer als durch konventionelle und sind unkonventionelle Verfahren in konventionelle Anlagenstruktur einordenbar?“ Die Rolle regenerativer Energiequellen zur Vermeidung von Umweltbelastungen oder die Bedeutung der Regenerativen in anders strukturierten Energiesystemen wird damit von vornherein aus der Betrachtung ausgeschlossen.

In der Studie wird für das Jahr 2000 ein wirtschaftliches Potential von etwa 4 300 PJ Primärenergie ermittelt, was einem Anteil von 0,25 % an der gesamten Energieversorgung darstellt. Ohne „Nachweis der Wirtschaftlichkeit“, werden für solarthermische Energiegewinnung 0,25 %, für geothermische Energiegewinnung 0,085 % und für Windenergienutzung 0,40 % für das Jahr 2000 angesetzt.

Die zweite Studie [MKE 1988] geht von der Substitution von Rohbraunkohle durch die regenerativen Energiequellen aus. Hier werden erstmals systemanalytische Gesichtspunkte mit eingebracht. So werden z. B. die vermeidbaren Energieaufwendungen für den Transport der Rohbraunkohle sowie die vermiedene Förderung niederkalorischer Kohlen berücksichtigt. In letzter Konsequenz werden alle Potentiale als Rohbraunkohle-Ablösungs-Potential behandelt.

Im Ergebnis dieser Studie wird das Potential in der DDR wie folgt angegeben:

Geothermie	600 000 t Rohbraunkohle
Kleinwasserkraft	430 000 t Rohbraunkohle
Biogas aus Abwasser	370 000 t Rohbraunkohle
Biogas aus Deponien	160 000 t Rohbraunkohle
Biogas aus Gülle	110 000 t Rohbraunkohle
Windenergie	41 000 t Rohbraunkohle
Sonnenenergie	31 000 t Rohbraunkohle
Umweltwärme	30 000 t Rohbraunkohle
Gesamt	1 772 000 t Rohbraunkohle

In den folgenden Abschnitten werden für die verschiedenen regenerativen Energiequellen grobe Abschätzungen über die erschließbaren Potentiale skizziert, wobei an dieser Stelle darauf hingewiesen werden muß, daß eine genaue Potential Ermittlung nur in konkreten Energiekonzepten erfolgen kann.

#### 4.2 Geothermie

In der DDR stehen nördlich der Linie Magdeburg-Berlin-Cottbus in etwa 1500 bis 2000 Meter Tiefe niedrigthermale Wasservorkommen im Temperaturbereich von 40 bis 90°C zur Verfügung. 1984 wurde in Waren (Müritz) eine erste Versuchsanlage mit 5 MW Wärmeleistung zur Versorgung von 1000 Wohnungen (Endausbau) mit Heizenergie und Warmwasser in Betrieb genommen [HESSE 1986]. Weitere Anlagen mit einer Leistung von 7 bzw. 10 MW wurden 1988 in Betrieb genommen [MKE 1988 S.5].

Insgesamt wird in [MKE 1988 S.6] eine mögliche thermische Leistung von 350 MW für das Jahr 2000 angegeben. Der Hersteller und Betreiber der Anlagen, der VEB Geothermie wies in einem Schreiben vom 19. März 1990 an den GRÜNEN TISCH der DDR auf potentielle Standorte u. a. in Schwerin, Stralsund und Neuruppin hin und bezifferte die erschließbaren Leistungen bis zum Jahr 2000 auf 300 bis 600 MW. Dabei wurden Anlagengrößen von 5 bis 50 MW unterstellt.

Die Arbeiten zur Gewinnung von geothermischer Energie durch die Wassereinpresseung in heißes und trockenes Tiefengestein (Hot-Dry-Rock-Verfahren) wurden 1984 wegen technologischer Probleme abgebrochen [HEINZ 1986].

#### 4.3 Wasserkraftnutzung

Auf dem Gebiet der DDR stehen für die Nutzung von Kleinwasserkraftwerken Flußläufe und Talsperren zur Disposition. Vor allem wegen des Fehlens von Produktionslinien für maschinentechnische Ausrüstungen (z. B. Turbinen) wurden in der DDR seit 1970 510 Kleinwasserkraftwerke stillgelegt. Derzeit sind noch 120 Kleinwasserkraftwerke mit einer installierten Leistung von 42 MW in Betrieb, wobei die Ausrüstungen bis zu 90 Jahre alt sind [MKE 1988 S.11].

Eine Beschreibung verschiedener Standorte findet sich in [BÖDEKER 1983 S.210f; BÖDEKER 1985a; BÖDEKER 1985b; BÖDEKER 1986 und KLAUCK 1986].

Allein im Bezirk Chemnitz sollen auf Initiative des Bezirkstages 100 Standorte auf Möglichkeiten zur Rekonstruktion überprüft werden.

Nach [MKE 1988 S.11] ist durch die Wiederinbetriebnahme von 100 der leistungsstärksten Anlagen eine installierte Leistung von 50 bis 60 MW gewinnbar. An ca. 70 Neubaugstandorten sollen weitere 50 bis 60 MW installierbar sein. Insgesamt ergibt sich somit eine installierbare elektrische Leistung von 160 MW.

Da in der DDR eine ganze Reihe von kleineren Anlagenstandorten für den Leistungsbereich von 10 bis 100 KW existieren und die in der Studie berücksichtigten Restriktionen durch notwendig werdende Importe faktisch aufgehoben wurden, könnten weitere Potentiale erschlossen werden. Bei einem Großteil dieser Anlagen würde sich die Eigenversorgung von kleineren Gewerbebetrieben bzw. Privathaushalten anbieten, was unter ökonomischen Gesichtspunkten besonders interessant ist. Bei einer durchschnittlichen Benutzungszeit von 5500 Stunden im Jahr errechnet sich eine gewinnbare elektrische Arbeit aus 160 MW von 880 GWh.

Für den Spitzenlastbereich sind weiterhin die Pumpspeichieranlagen der DDR nicht zu vernachlässigen. Mit der in Planung befindlichen Anlage wird sich die installierte Kapazität dieser Anlagen auf 2 000 MW<sub>e</sub> erhöhen.

Die durch kleinere Anlagen gewinnbare elektrische Arbeit ist auf Grund der nicht erfaßten Ausgangsdaten derzeit nicht quantifizierbar.

Für die DDR liegen keine Kostenabschätzungen für die Reaktivierung und den Neubau von Wasserkraftanlagen vor. Studien aus der Bundesrepublik zeigen jedoch, daß gerade Modernisierungsmaßnahmen sehr kostengünstig durchgeführt werden können. Eine Energiestudie für das Land Baden-Württemberg weist Kosten für Modernisierungsmaßnahmen in der Höhe von 3,4 Pf/kWh bis 8,1 Pf/kWh nach [DLR 1987]. Dieser Kostenrahmen konnte in einer Reihe von Einzeluntersuchungen bestätigt werden [Öko 1987, Öko 1989a, Öko 1989b].

#### 4.4 Potentiale der Biomassenutzung

Die Energiegewinnung aus Biomasse wurde nach den vorliegenden Daten bisher ausschließlich aus der Sicht der Biomassevergasung untersucht. Zu allen anderen Möglichkeiten der Biomassenutzung liegen für die DDR keine sicheren Informationen vor.

Die Gasgewinnung aus Biomasse kann im wesentlichen drei Quellen zugeordnet werden:

- Anlagen zur Verwertung von Gülle bzw. anderen landwirtschaftlichen Abfällen,
- Mülldeponien (Deponiegas),
- Kläranlagen der Wasserwirtschaft.

In der Landwirtschaft der DDR wurden 1987 etwa 9 Mio. m<sup>3</sup> Biogas erzeugt. Diese Menge wurde in 6 ausschließlich großtechnischen Anlagen erzeugt (bis zu 115000 Schweine!) [ENGSHUBER 1987]. (In [MKE 1988 S.9] wird für das Jahr 1990 eine Produktion von 7,5 Mio. m<sup>3</sup> angegeben.)

Untersuchungen, die von dieser stark zentralisierten „industriellen Tierproduktion“ ausgingen, ergaben einen jährlichen Ertrag von brutto 200 Mio. m<sup>3</sup> Biogas aus 170 Rinder- und 120 Schweinehaltungen [ENGSHUBER 1983] mit einer täglichen Biogasproduktion von 500 bis 1000 m<sup>3</sup>.

Bei einem durchschnittlichen Eigenbedarf an Wärme von 40 % liegt die zur Verfügung stehende Biogasmenge bei etwa 120 Mio. m<sup>3</sup>. In [MKE 1988 S.9] wird für die Zeitreihe 1990–1995–2000 jedoch nur eine Nettomenge von 7,5, 14,0 und 17,0 Mio. m<sup>3</sup> Biogas aus landwirtschaftlichen Anlagen angesetzt.

Im Interesse einer ökologischen Tierhaltung können die bislang in der DDR betriebenen großtechnischen Anlagen nicht den anzustrebenden Standard darstellen. Vielmehr ist eine Dezentralisierung der Viehhaltung notwendig. Damit ist auch der Einsatz von Biogasanlagen mit einer Größe von unter 100 GVE verbunden. Aber auch Zentralanlagen, die von mehreren zu einem Substratverbund zusammengeschlossenen landwirtschaftlichen Betriebe mit Gülle versorgt werden, haben sich als wirtschaftlich attraktiv erwiesen.

Ausgegorene Gülle ist im übrigen sehr pflanzenverträglich und kann daher auch während der Wachstumsphase der Pflanzen ausgebracht werden, womit sich der Einsatz von teurem Kunstdünger verringern läßt. Die Problematik der Nitratbelastung des Grundwassers kann auf diese Weise nachhaltig entschärft werden.

Geht man davon aus, daß optimierte Anlagen bis in den Bereich von einigen zehn Großvieheinheiten (GVE, z. B. 1 Rind, 3 bis 4 Schweine [ENGSHUBER 1982 S.23 ff]) wirtschaftlich betrieben werden können [BINE 1986], kann die gewinnbare Biogasmenge höher als 120 Mio. m<sup>3</sup> netto angegeben werden. Gelingt es, Biomasse (Gülle, feste landwirtschaftliche Abfälle etc.) im Äquivalent von 3 Mio. GVE (DDR-Viehbestand zum Vergleich: etwa 5,8 Mio. Rinder, 13 Mio. Schweine) für die Biogasherstellung zu nutzen, so ergibt sich bei einem Anfall von 1 m<sup>3</sup>/Tag Biogas pro GVE im Jahresschnitt und einem Eigenbedarf von 40 % eine jährlich nutzbare Menge von ca. 650 Mio. m<sup>3</sup> Biogas (= 15 000 TJ).

Ein beträchtliche Quelle für Biogas sind Kläranlagen. In [MKE 1988 S.9] werden für die Jahre 1990, 1995

und 2000 31,0, 52,0 und 58,0 Mio. m<sup>3</sup> Biogas (netto) für gewinnbar gehalten.

Setzt man die im Betrieb, im Bau sowie die derzeit nicht in Betrieb befindlichen Faulräume mit einer durchschnittlichen Biogasproduktion von 215 000 m<sup>3</sup> am Tag an, so ergibt sich bei einem Eigenbedarf von 40 % für den Faulprozeß eine jährliche Summe von 47 Mio. m<sup>3</sup>. Die in [MKE 1988 S.9] genannten Größen dürften damit etwa das ausschöpfbare Potential zeigen.

Ein Problem der Biogasgewinnung besonders in Klärwerken ist die wirkliche Nutzung des anfallenden Gases. So werden im Klärwerk Berlin-Schönerlinde (tägliche Biogasproduktion 14 000 m<sup>3</sup>) wegen fehlender Anlagen zur Nutzung bzw. Fortleitung jeden Tag etwa 5 000 m<sup>3</sup> Gas abgefackelt anstatt hiermit in einem BHKW Strom und Wärme zu erzeugen! Einen Hinweis auf diesen Tatbestand findet sich auch in [ENGSHUBER 1989].

Für die Deponiegasgewinnung aus geordneten Deponien wird als Orientierungswert angegeben, daß aus 1 Kilogramm Hausmüll etwa 0,15 bis 0,2 m<sup>3</sup> Gas gewonnen werden kann. Auf der Deponie Erfurt-Schwerborn (1 Mio. t Müll) werden so täglich etwa 5700 m<sup>3</sup> Deponiegas gewonnen [Reisen 1988 S.146]. Auf der Deponie Neu-Fahrland (Kreis Potsdam) werden täglich etwa 2 000 m<sup>3</sup> abgesaugt [NEUE ZEIT 10.01.1989]. Probleme der Deponiegasverwertung entstehen durch den Gehalt des Gases an Kohlenwasserstoffen (höhere Alkane, zyklische Kohlenwasserstoff-Verbindungen, halogenierte Kohlenwasserstoffe).

In der DDR sind nach [WOLF 1988] noch mindestens 17 weitere Deponiestandorte mit einer Nettogasproduktion größer als 100 m<sup>3</sup> pro Stunde erschließbar. Damit dürften die in [MKE 1988 S.9] bezifferten Potentiale von 30, 33 und 34 Mio. m<sup>3</sup> Deponiegas für die Jahre 1990, 1995 und 2000 bestätigt werden.

Zusammenfassend läßt sich die gewinnbare Energiemenge wie folgt beziffern:

Tabelle 11

### Zusammenstellung des Biogaspotentials

Energieäquivalent Quelle	Anfall [Mio. m <sup>3</sup> ]	Heizwert	
		MJ/m <sup>3</sup>	[TJ]
Landwirtschaft (o. g. Ansatz) .....	650	24	15 600
Abwasserbehandlung .....	58	24	1 400
Deponien .....	34	18	610

Wird die Vergütung für den in das öffentliche Netz eingespeisten Strom mit den vermiedenen Erzeugungskosten eines neuen Großkraftwerkes bewertet (19 bis 23 Pf/kWh), so ist zu erwarten, daß mindestens 50 % des anfallenden Biogases als Energieträger für BHKW verwendet werden.

Unterstellt man für die BHKW eine Stromkennzahl von 0,5 so ergäbe sich daraus eine Stromerzeugung in Höhe von 733 GWh/a (etwa 0,75 % des Stromendverbrauchs 1988) sowie 1466 GWh Wärmeenergie.

### 4.5 Wind

In der DDR gibt es eine intensivere Beschäftigung mit der Windenergie erst seit den letzten Jahren. Nachdem einige Jahre eine Versuchsanlage der Akademie der Wissenschaften auf der Insel Hiddensee betrieben wurde, ging 1989 eine auf Privatinitiative errichtete Anlage in Rostock mit einer Leistung von 55 kW (weiterer Ausbau bis 100 kW geplant) in Betrieb. Diese Anlage entsprach jedoch nicht dem Stand der Technik (z. B. Hubschrauberflügel als Rotor). Im gleichen Jahr

wurde in Wustrow auf der Insel Rügen eine 200 kW-Anlage der dänischen Firma VESTAS in Betrieb genommen. Die Eignung von Mittelgebirgsstandorten zeigt die Anlage eines kirchlichen Heims in Neuhaus am Rennsteig (Thüringer Wald 750 m über NN) mit einer Leistung von 22 kW.

Die Abschätzungen für das Windenergiepotential in der DDR sind äußerst unscharf. Die Abschätzungen in [NOACK 1980] gehen von der rein theoretischen Installation von 100 Großanlagen einer Leistung von 3 MW aus.

In [MKE 1988 S. 13] werden ausschließlich Kleinanlagen zur Tränkwasserversorgung quantifiziert. Die Potentialangaben dieser Studien sind somit wertlos.

Entsprechend einer zitierten Studie des Energiekombinats Rostock sollen Erzeugungskosten der für die Stromgewinnung genutzten Versuchsanlagen unter denen der konventionellen Kraftanlagen des Energiekombinats liegen.

Da Anlagen der unteren und mittleren Leistungs-kategorie (10 bis 250 kW) ausgereift sind, könnte die Errichtung von Windenergieparks im Küsten- und flachen Binnenland in den Nordbezirken relativ schnell erfolgen. Der Einstieg in die Produktion von Windanlagen könnte durch die Tatsache erleichtert werden, daß die DDR sowohl Generatoren als auch Getriebe für Windkraftanlagen bereits für den Export herstellt [TG 1989].

Je nach Anlagenstandort können Windkraftanlagen mit Stromgestehungskosten von 10 bis 20 Pf/kWh bisweilen mit konventionellen Kraftwerken konkurrieren. Nicht zuletzt durch das 100 MW-Windenergie-Förderprogramm der Bundesregierung entstehen derzeit vornehmlich in der norddeutschen Küstenregion Windparks und Einzelanlagen, die von Versorgungsunternehmen, Gemeinden, Gewerbebetriebe und Privatleuten betrieben werden. Das Demonstrationsprogramm – ursprünglich auf die Laufzeit von 5 Jahren ausgelegt – erfuhr eine solch große Resonanz, daß es innerhalb eines halben Jahres ausgebaut war. Das Förderprogramm wird deshalb auf 200 MW erhöht.

Das mit der Windenergie auch im Norden der DDR kostengünstig Strom produziert werden kann, läßt sich aus einem Angebot des dänischen Windkraftanlagenbauers Vestas ableiten: Bei einer Energiekonferenz im Mai 1990 in Ost-Berlin machte ein Vertreter der Firma das Angebot, 600 Anlagen zu errichten. Als Voraussetzungen nannte er lediglich günstige Einspeisetarife und Ausweisung kostengünstiger Standorte.

Eine Quantifizierung des wirtschaftlich erschließbaren Windenergiepotentials für die DDR kann aber derzeit auf Grund der völlig unsicheren Datenlage nicht erfolgen.

## 4.6 Sonne

### Vorbemerkungen

Die passive und aktive Nutzung der Sonnenenergie stellt eine heute und perspektivisch wichtige Energie-

quelle dar. Viele der Technologien im Bereich der passiven Nutzung bzw. der Kollektornutzung sind erprobt und einsatzfähig. Im Bereich der Photovoltaik vollziehen sich wichtige Entwicklungen. Die Rolle dieser Energieumwandlungen im Gesamtsystem wird jedoch bereits heute von zwei wichtigen Punkten bestimmt:

1. Der Effizienz des Einsatzes wird wesentlich mitbestimmt durch die gewonnenen Erfahrungen bei der Anwendung der verschiedenen Anlagen. Die Erfahrungen zeigen, daß allein durch die Optimierung des Betriebes und der Anlagenkonzeption beträchtliche Effizienzerhöhungen erreicht werden können.
2. Die Sonnenenergienutzung ist an vielen Stellen inkompatibel zur heutigen Struktur der Energiebedarfsdeckung. Sonnenenergie ist stärker als andere regenerative Energiequellen von sparsamsten Techniken des Energieeinsatzes abhängig. Die Nutzung dieser Energiequelle in einem auf extensiven Energieverbrauch ausgerichteten System ist nicht sinnvoll möglich. Am deutlichsten zeigt sich diese Tatsache heute auf dem Gebiet der passiven Sonnenenergienutzung.

### 4.6.1 Passive Sonnenenergienutzung

Die passive Sonnenenergie ist im Grenzbereich zwischen rationeller Energieanwendung und der Energieerzeugung anzusiedeln. Sie beruht im wesentlichen auf der Nutzung bauphysikalischer und architektonischer Prinzipien zur Nutzung der einfallenden Sonnenstrahlen und der Minimierung der Wärmeverluste:

1. Anordnung von Glasflächen und umgrenzenden massiven Konstruktionen unter Beachtung des Wärmeschutzes.
2. Nutzung des Energiegewinns aus der Sonneneinstrahlung durch große Südfenster, Wintergärten, Doppelfassaden und Luftkollektoren sowie durch angepaßte Heizungssysteme (Zonen-, Einzelraumheizung).
3. Verminderung von Wärmeverlusten über die Glasflächen durch Maßnahmen des zeitweiligen Wärmeschutzes (Rollos, rollbare Wärmeschutzfolien, Jalousien).
4. Kompakte Gebäudeform.

In der DDR wurden Untersuchungen an passiven Solarhäusern u. a. durch die Hochschule für Architektur und Bauwesen in Weimar angestellt. Die erreichten Einsparungen bewegten sich zwischen 31 und 45 % [LINDNER 1988; LINDNER 1989].

Diese Ergebnisse liegen in der Größenordnung der internationalen Erfahrungen, wobei hier in Langzeituntersuchungen Spitzenwerte von bis zu 54 % in nördlichen klimatischen Zonen beschrieben werden [MELIB 1988].

Im Vergleich mit normalen Wohnbauten ergibt sich folgendes Bild [LINDNER 1988; BINE 1989]:

Tabelle 12

## Spezifischer Heizenergieverbrauch verschiedener Haustypen

Heizsystem		Spezifischer Heizenergieverbrauch [GJ/m <sup>2</sup> ·a]	Index
Einfamilienhaus	Fernwärme	1970: 0,846	220
	Zentralheizung	1970: 0,972	253
	Einzelraum-Heizung	1970: 0,406	106
„Normalhaus“ BRD		1984: 0,551	143
Niedrig-Energiehaus BRD 4 a)			
Großer Wohnblock		1988: 0,385 .. 0,576	100 .. 150
pass. Solarhaus		1988: 0,209	54

Die Nutzung von Elementen der passiven Sonnenenergienutzung ist auch für bereits bestehende Gebäude möglich [MELIB 1989].

Der Nachweis für die passive Nutzung der Sonnenenergie in öffentlichen Gebäuden wird in der DDR durch das Hauptpostamt in Berlin-Marzahn erbracht.

Um jedoch einen nennenswerten Beitrag im Niedertemperaturwärmebereich leisten zu können, muß die Solarenergienutzung zukünftig weitaus stärker in der Gebäudeplanung und in einer energiesparenden Bauleitplanung Berücksichtigung finden. Niedrigenergiehäuser, die nach diesen Grundsätzen geplant und gebaut werden, benötigen nur 10-20% des Energiebedarfs eines konventionell gebauten Hauses [OLEIKO 1986].

#### 4.6.2 Aktive Solarnutzung: Kollektoren

Die Erzeugung von Wärme über Sonnenkollektoranlagen ist im wesentlichen für die Prozeßwärme- und Warmwasserbereitung im Niedertemperaturbereich und in den Übergangszeiten teilweise für die Raumheizung sinnvoll.

Die Warmwasserbereitung mit Kollektoranlagen ist technisch so weit ausgereift, daß im Sommer etwa 100%, in der Übergangszeit 65% und in den Wintermonaten 20% des Warmwasserbedarfs mit Solar-Warmwasserbereitungsanlagen abgedeckt werden können [STEPHAN 1979]. Flachkollektoren können im Jahresschnitt etwa 360 kWh pro m<sup>2</sup> liefern. Vakuum-Röhrenkollektoren erreichen Werte von 480 kWh pro m<sup>2</sup> und Jahr. Untersuchungen für die DDR ergaben bei Ausrüstung von 150 000 Eigenheimen mit kombinierten Anlagen zur Raumheizung und Heißwasserbereitung Brennstoffeinsparungen von bis zu 40%. Modellrechnungen für den relativ oft gebauten Nebautyp WBS 70 ergaben, daß mit einer Kollektorfläche von 200 m<sup>2</sup> (etwa 40% der Dachfläche) ein Warmwasserbedarf von 50 Liter pro Einwohner mit einer Energieeinsparung von 63 000 kWh im Jahr bereitstellbar wäre [STOYE 1979].

Andere Untersuchungen in der DDR beschreiben die Einsparung von 8 000 kWh im Jahr durch den Betrieb einer 24-m<sup>2</sup>-Kollektoranlage [BOSCHNAKOW 1981].

Seit 1985 wurden nach in der DDR [MKE 1988 S.16] jährlich etwa 1000 m<sup>2</sup> Kollektorflächen für die Warmwasserbereitung hergestellt. Im einem Szenario werden für das Jahr 1995 60 000 m<sup>2</sup> und für das Jahr 2000 200 000 m<sup>2</sup> installierbarer Kollektorfläche angegeben. Für die BRD werden im Jahr 1988 250 000 m<sup>2</sup> installierte Niedertemperaturkollektoren angegeben [MELIB 1988].

In der BRD sind für die aktive Nutzung der Sonne mittels thermischer Flachkollektoren unterschiedliche Systeme erhältlich, denen der TÜV Bayern in einem im Jahre 1985/86 durchgeführten Langzeittest eine ausgereifte Technik bescheinigte. Eine in die Haustechnik integrierte Solaranlage zur Brauchwarmwasserbereitung mit 6 bis 8 m<sup>2</sup> Kollektorfläche kostet heute 8 000 bis 12 000 DM und spart jährlich 300-400 l Öl ein. Daraus ergeben sich Wärmepreise von 13 bis 26 Pf/kWh [MESSE 1987].

Somit sind Solaranlagen für die Brauchwassererwärmung in privaten Haushalten bei dem derzeit niedrigen Energiepreisniveau und bei einer betriebswirtschaftlichen Betrachtungsweise (ohne Berücksichtigung der externen Kosten und Nutzen) in der Regel noch nicht wirtschaftlich.

Dies darf jedoch nicht die Begründung für die Aussparung der Sonnenergie sein:

- zum einen lassen sich auch in der heutigen Situation wirtschaftliche Nischen für die Solarenergienutzung finden (Solare Schwimmbadheizung, Einspeisung in (Niedertemperatur-)Wärmenetze, Luftkollektoren),
- zum anderen sprechen sowohl die externe Kosten für eine Markteinführungshilfen, als auch die Tatsache, daß durch eine Aufnahme der Massenproduktion die spezifischen Kosten für die mittels Solarenergie gewonnene kWh wesentlich reduziert werden könnten,

- darüberhinaus muß mittel- und langfristig mit weiter steigenden Energiepreisen gerechnet werden, die dann die Wirtschaftlichkeit der Solaranlagen verbessern.

Wirtschaftlich konkurrenzfähig ist der Einsatz von Sonnenenergie heute bereits bei Freibädern, da hier der Energiebedarf sehr gut mit der Dargebotscharakteristik der Sonne korreliert [LEUCHTNER 1989].

#### 4.6.3 Aktive Solarnutzung: Photovoltaik

Sonnenstrahlung läßt sich mittels Solarzellen auch zur direkten Stromerzeugung nutzen. Einem Marktdurchbruch der Photovoltaik standen bislang noch die hohen Stromgestehungskosten von über 1,00 DM/kWh entgegen. Solarstrom ist heute daher nur in den Fällen wirtschaftlich, wenn dadurch ein teurer Anschluß an das öffentliche Netz vermieden werden kann. Eine Studie der Ludwig-Bölkow-Systemtechnik beweist aber, daß eine Kostenreduzierung auf etwa 30 Pf/kWh innerhalb von 5 Jahren durch die Einführung einer rationellen Massenproduktion möglich ist. Hierzu wäre freilich eine Kapazitätserhöhung der derzeitigen bundesdeutschen Produktion von rund 3 MW/a auf das Fünffache erforderlich [BÖLKOW 1988].

In der DDR gibt es bisher keinerlei Aktivitäten zur Nutzung der direkten Umwandlung von Sonnenenergie in elektrischen Strom.

Die breite Anwendung der Photovoltaik ist abhängig von der Entwicklung der Wirkungsgrade und der Modulherstellungskosten. Dabei werden durch neue Herstellungstechnologien und Materialien noch wesentliche Systemverbesserungen eintreten (vgl. [HUBBARD 1989]). Heute werden Wirkungsgrade von 13–15 % für kristalline Zellen und 8 % für amorphe Zellen in der Serienfertigung erreicht.

Das folgende Beispiel soll die perspektivische Sinnfälligkeit von Photovoltaikanlagen selbst für die DDR zu zeigen. Die mittlere Globalstrahlung für Potsdam beträgt 1024 kWh/m<sup>2</sup>.a [LIPPOLD 1984 S.46]. Würden etwa 10 % der Dachflächen in der DDR (etwa 300 Mio. m<sup>2</sup>) mit Solargeneratoren belegt, so läßt sich ein Strom-Erzeugungspotential von etwa 3,0 TWh errechnen.

#### 4.7 Heutige Möglichkeiten der Nutzung erneuerbarer Energiequellen in der DDR

Durch den derzeitigen Umbauprozess der Energiewirtschaft in der DDR besteht die einmalige Chance, erneuerbare Energiequellen dort, wo bereits heute volkswirtschaftlich sinnvoll, in die Konzeption miteinzubeziehen:

- Durch den großen Anteil von Nah- und Fernwärme in der DDR kann mit relativ geringem Kostenaufwand eine Kraft-Wärme-gekoppelte Stromerzeugung aufgebaut werden. Dadurch werden auch Möglichkeiten geschaffen, erneuerbare Energiequellen zu nutzen. In vielen Fällen können Blockheizkraftwerke mit Biogas oder Holzgas betrieben

werden. Wie in Schweden bereits angewandt, eignen sich aber Nahwärmesysteme auch zur Einkopplung von Solawärme aus Kollektoren.

In reinen Heizwerken ist auch Reststroh oder Restholz für die Nahwärmeversorgung einsetzbar. Für den Fall der Biogasnutzung ergeben sich über den energetischen Aspekt hinaus Umweltvorteile in der Landwirtschaft und bei der Trinkwasserversorgung, da durch die Vergärung von Gülle die Nitratbelastung der Böden erheblich reduziert werden kann.

- Windenergie läßt sich insbesondere an der Ostseeküste umfangreich nutzen. Durch den Aufbau dezentraler Windkraftparks können u.U. Netzverstärkungs- und Leitungskosten vermieden werden, sodaß mit der Nutzung von Windenergie positive Systemeffekte entstehen.
- Die Stromerzeugung aus Wasserkraftanlagen läßt sich in der Regel durch Reaktivierungs-, Modernisierungs- oder Neubaumaßnahmen realisieren. Im Vergleich zu anderen Stromerzeugungsalternativen sind die Kosten vergleichsweise gering, wenn man die lange Nutzungsdauer der Wasserkraftanlagen von über 50 Jahren in Betracht zieht.
- Bei der weiteren Reduzierung des Stromverbrauchs aus konventionellen Kraftwerken werden Photovoltaikanlagen gegenüber anderen Maßnahmen wie der Stromeinsparung und der Ausbau der Kraft-Wärme-Kopplung bis auf weiteres eine geringere Bedeutung erlangen, was auf die noch hohen Stromgestehungskosten von ca. 1 DM/kWh zurückzuführen ist. Der Ausbau von Photovoltaikanlagen zum heutigen Zeitpunkt sollte daher eher unter dem Aspekt der Demonstrationswirkung und Erfahrungsgewinn mit solchen Anlagen gesehen werden. Für einen verstärkten Ausbau der Solarzellenproduktion und das Überschreiten der Wirtschaftlichkeitsschwelle der Photovoltaik sind solche Demonstrations- und Pilotprojekte wichtig, wenngleich mit demselben Aufwand, an anderer Stelle (z. B. Stromerzeugung mit Wind) mehr erreicht werden kann.
- Bei der anstehenden Sanierung eines großen Teils des Gebäudebestandes können Anlagen zur Nutzung von Solarenergie für die Warmwasserbereitung und aktiven Raumheizung sowie für die Stromerzeugung wirtschaftlicher in die Gebäudestruktur integriert werden. Der nachträgliche Einbau in bereits sanierte Gebäude ist dagegen aufwendiger.

In Zusammenhang mit einer Gebäudesanierung ist auch die energetische Optimierung der Sanierungsmaßnahme im Hinblick auf die passive Nutzung von Solarenergie möglich. Diese Optimierung betrifft zum einen die Ausgestaltung von Wintergärten, die Installation einer auf Niedertemperatur ausgelegte und damit für die Solarenergie-nutzung geeigneten Heizungssystems.

Daß das gesamte Potential der erneuerbaren Energiequellen langfristig ausreicht, um unseren Energieverbrauch vollständig zu decken, wurde in mehreren Potentialstudien unterschiedlicher Forschungsinstitute

bewiesen. In einer Untersuchung des „International Institute for Applied System Analysis (IIASA)“ in Laxenburg wurde das Potential der Solarenergie für Westeuropa untersucht mit dem Ergebnis, daß „nach einer Zeitspanne von ungefähr 100 Jahren praktisch alle Bedarfskategorien mit Hilfe eines beständigen Energiesystems auf der Grundlage der solaren und regenerativen Energiequellen versorgt werden können“ [IIASA 1982].

Diese Aussage ist auch auf die Verhältnisse der DDR übertragbar.

## 5. Rahmenbedingungen für eine rationale Energiepolitik

### 5.1 Allgemeine Rahmenbedingungen

Die Braunkohle wird mittelfristig ein Standbein der Energiewirtschaft für das Gebiet der DDR bleiben. Heute kommt es jedoch darauf an, die Strukturen und Rahmenbedingungen zu schaffen, daß

- der Abbau und Einsatz von Braunkohle minimiert wird (parallel hierzu ist ein Auffangprogramm für den Braunkohlebergbau notwendig),
- die Stromerzeugung weitgehend auf umweltschonende Kraft-Wärmekopplung (Kohle, Erdgas, Biogas) umgestellt wird und
- die restlichen Braunkohlemengen durch modernste Technik und mit möglichst geringer Umweltbelastung eingesetzt wird.

Um dieses Ziel zu erreichen, müssen alle Einsparpotentiale auf der kommunalen und regionalen Ebene erschlossen werden. Dies wiederum erfordert eine weitgehende Strukturänderung der Energieversorgung in der DDR. Anstelle des bisherigen zentralistischen Planungssystems muß die Kommunalisierung der Energieversorgung treten. Nur auf der kommunalen Ebene ist die systematische Erfassung und Umsetzung der Potentiale der rationellen Energienutzung möglich. In diesem Abschnitt sollen deshalb Aussagen über die notwendigen Veränderungen der Rahmenbedingungen gemacht werden. Dies soll jedoch nicht heißen, daß unter den gegebenen Rahmenbedingungen eine kommunale Energieversorgung nicht möglich oder nicht wirtschaftlich wäre. Sie wird jedoch wesentlich erschwert.

### 5.2 Schwierige Ausgangslage

Am 17. Mai 1990 hat die Volkskammer in Ostberlin die Selbstverwaltung der Gemeinden und Landkreise in der DDR mit der erforderlichen Zwei-Drittel-Mehrheit beschlossen. Diese Kommunalverfassung stellt ausdrücklich klar, daß die Versorgung mit Energie und Wasser wie auch die Abwasser- und Abfallentsorgung zu den Selbstverwaltungsaufgaben und damit zu dem „eigenen Wirkungskreis“ der Gemeinden gehört. Dies ist fachlich durch die drei Grundpfeiler einer zukünftigen ökologisch- und sozialverträglichen Energiewirtschaft begründet: der rationellen Energieanwendung und -umwandlung (KWK) und der Nut-

zung regenerativer Energiequellen. Alle drei Potentiale können nur auf der kommunalen Ebene systematisch geplant und genutzt werden.

Zudem ist von der Regierungskoalition in der DDR beschlossen worden, daß die Entflechtung der Energiekombinate und die Gründung von Stadtwerken anzustreben ist.

Dennoch ist zu befürchten, daß eine kommunale Energieversorgung in der DDR nicht der „Normalfall“ werden wird. Das Dilemma der derzeitigen Situation drückt sich in folgenden Punkten aus:

- Einsparpotentiale bei der Energienutzung sind in sehr hohem Maße vorhanden, jedoch verfügen die Träger der Maßnahmen (Gemeinden, Private, Gewerbebetriebe, öffentliche Einrichtungen) in der Regel nicht über die erforderlichen Investitionsmittel – auch wenn die Maßnahmen in hohem Maße wirtschaftlich sind – und die Rückflußzeit der Investitionen relativ kurz ist.
- Das Wissen über die Möglichkeiten der rationellen Energienutzung ist in der DDR noch weniger verbreitet als in der Bundesrepublik.

Erschwerend kommt hinzu, daß in der DDR in der derzeitigen Situation des Umbruchs, die Zuständigkeiten für Maßnahmen im Bereich der Gemeinden unklar sind und zudem viele andere dringende(re) Probleme anstehen.

- In der derzeitigen Situation scheint es für viele Gemeinden verlockend zu sein, die Zuständigkeit der Versorgung einem finanzstarken Unternehmen abzutreten. Dabei ist den Gemeinden jedoch häufig nicht bewußt, welche Chancen sie mit diesem Schritt verspielen: die bundesdeutschen Konzerne verfügen zwar über die wirtschaftliche Macht, über das Knowhow auf der Erzeugungs- und Verteilungsseite sowie über hohe Finanzreserven, doch haben sie – trotz gegenteiliger Beteuerungen weniger Interesse an rationeller Energienutzung oder an kommunaler Stromerzeugung auf Basis der Kraft-Wärme-Kopplung, sondern sind stärker daran interessiert, ihre Absatzmärkte auszudehnen und langfristig den von ihnen angebotenen Energieträger zu verkaufen.

In den folgenden Abschnitten sollen Vorschläge abgeleitet werden,

- wie die Rahmenbedingungen für eine kommunale Energieversorgung, die sich auf eine umweltschonende und ökologische Versorgung mit Energiedienstleistungen ausrichten muß, verbessert werden können,
- wie den Gemeinden in der DDR beim Aufbau gemeindeeigener Unternehmen geholfen werden kann und
- welche begleitende Maßnahmen notwendig sind, um der rationellen Energienutzung in der DDR zum Durchbruch zu verhelfen.

Die Energieversorgung der DDR steht im Sommer 1990 vor einer wichtigen Verzweigungssituation:

- \* Wird auf dem Gebiet der DDR, nach dem Vorbild der BRD, eine zentralistische, angebotsorientierte,



und hochkonzentrierte Energieversorgung mit westdeutschen Kapitalmehrheiten geschaffen, oder wird sich eine kommunale Energieversorgung mit einer stärkeren Betonung des Energiedienstleistungsgedanken durchsetzen?

- \* Wird der Zubau bzw. der Ersatz von Kraftwerkskapazitäten auf der Basis von Kondensationskraftwerken stattfinden oder werden dezentrale KWK-Anlagen einen wesentlich höheren Beitrag zur Stromerzeugung leisten?
- \* Wird die Energieversorgung weiterhin über die Köpfe der Bevölkerung hinweg geplant und die Bürger verplant oder werden die Bürger an der zukünftigen Energieplanung demokratisch beteiligt?

### 5.3 Kommunale Energieversorgung

Auf der einen Seite stehen heute die Ziele und Aussagen der Regierungskoalition sowie die Vorteile einer kommunalen Energieversorgung, auf der anderen Seite stehen die westdeutschen Stromverbund- und Gasversorgerunternehmen mit ihren in Monopolgebieten gefüllten vollen Kriegskassen sowie die DDR-Energiekombinate, die Interesse haben, die alten Strukturen aufrecht zu erhalten. So versucht z. B. das Dresdner Energiekombinat über die Gewährung von Vergünstigungen für Mitarbeiter politischen Druck zu erzeugen, damit die Kombinatstruktur erhalten bleibt. Die Mitarbeiter erhalten

- ein unentgeltliches Deputat von 200 kWh Strom/Monat
- ein höheres Monatsgehalt
- eine bessere Rentenregelung und mehr Urlaub [ZfK 6/1990].

Die Energiekombinate versuchen zu ihrer Existenzsicherung Konzessionsverträge abzuschließen, die den kommunalen Handlungsspielraum einengen oder sogar ausschließen. In Unkenntnis der Auswirkungen der von den Kombinatangeboten Verträge sollen zahlreiche Kommunen solche Verträge unterzeichnet haben [ZfK 6/1990]. Das Öko-Institut arbeitet an einem Musterkonzessionsvertrag, der den Gemeinden zur Verfügung gestellt wird.

In Görlitz, Weimar, Rostock, Erfurt, Sonneberg, Waltershausen (Kreis Gotha), Nordhausen befinden sich bereits kommunale Werke im Aufbau. In Dresden, Chemnitz, Leipzig und anderen Städten wird der Aufbau eigener Stadtwerke diskutiert.

Als beste Lösung muß dabei der Aufbau eines Querverbundunternehmens für die Sparten Wärme, Gas, Elektrizität gelten, das sowohl in der Zielsetzung als auch in der Organisationsstruktur die rationelle Energieanwendung und die regenerativen Energiequellen entsprechend berücksichtigt.

Auch der Verband der kommunalen Unternehmen (VKU, Köln) sprach sich dafür aus, gemäß dem Privatisierungsgesetz das Eigentum an den Anlagen der Energie- und Wasserversorgung wieder an die Städte und Landgemeinden im heutigen DDR-Gebiet zu

übertragen. Er plädierte besonders für die Gründung wirtschaftlich arbeitender Querverbundunternehmen in kommunaler Hand, damit von vornherein verhindert werde, daß nur Defizitbetriebe wie etwa der öffentliche Nahverkehr den Kommunen verbleiben.

Der VKU wandte sich auch entschieden gegen die von Staatssekretär Pautz vom Ostberliner Ministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit vertretene Auffassung, daß nur Städte mit mehr als 100 000 Einwohnern Stadtwerke gründen sollten. [ZfK 6/1990]

Tatsächlich zeigen die Erfahrungen in der Bundesrepublik, daß auch kleinere Städte und Gemeinden mit Einwohnerzahlen von einigen Tausenden erfolgreich kommunale Querverbundunternehmen betreiben können.

In der Koalitionsvereinbarung der DDR-Regierung wurde der Aufbau von kommunalen Werken als besonders wichtig und förderungswürdig definiert. Auch die *rechtlichen Bedingungen* hierfür sind gegeben: Am 25.5.1990 verabschiedete die Volkskammer der DDR das Gesetz über die Selbstverwaltung der Gemeinden und Landkreise in der DDR (Kommunalverfassung). In Paragraph 2 dieses Gesetzes ist der Wirkungskreis der Gemeinden definiert: „Zu den Selbstverwaltungsaufgaben gehören vor allem die harmonische Gemeindeentwicklung . . . die Förderung von Wirtschaft und Gewerbe, die Gewährleistung des öffentlichen Verkehrs, die Versorgung mit Energie und Wasser . . .“. In Paragraph 60 wird dieser Auftrag noch genauer definiert: „Die Gemeinde darf Verträge über die Lieferung von Energie in das Gemeindegebiet sowie Konzessionsverträge, durch die sie einem Energieversorgungsunternehmen die Benutzung von Eigentum der Gemeinde einschließlich der öffentlichen Straßen, Wege und Plätze für Leitungen zur Versorgung der Einwohner überläßt, nur abschließen, wenn die Erfüllung der Aufgaben der Gemeinde nicht gefährdet wird und die berechtigten wirtschaftlichen Interessen der Gemeinde und ihrer Einwohner gewahrt sind. Hierüber soll der Gemeindevertretung vor der Beschlußfassung das Gutachten eines unabhängigen Sachverständigen vorgelegt werden.“

Ein Grund für den Aufbau eines kommunalen Querverbundunternehmens ist in dem hohen Sanierungsbedarf auf kommunaler Ebene zu sehen. Rund drei Viertel des Gebäudebestandes der DDR gelten als sanierungsbedürftig. Werden diese Gebäude saniert, so muß dies mit einer effizienten Wärmedämmung, mit dem Einbau hocheffizienter Fenster und mit der Umrüstung auf moderne Heizungssysteme (nach Möglichkeit Anschluß an eine Nahwärmeversorgung auf Basis der Kraft-Wärme-Kopplung) verbunden werden. Wird diese Gelegenheit verpaßt, so ist die wirtschaftliche Mobilisierung dieser Potentiale für Jahre, wenn nicht sogar Jahrzehnte vergeben.

Die Verbund-EVU versuchen über das Argument der Schaffung bzw. Erhaltung von Arbeitsplätzen den umgekehrten Weg zu begründen. So verweisen die drei Stromriesen bei dem geplanten Kauf des Gesamtpakets auf ihre Gesamtverantwortung für die Stromversorgung und auch für die Mitarbeiter der Energie-

kombinate: „Diese könnten sie nur übernehmen, wenn der Stromabsatz sichergestellt sei.“ [SZ 22.6.1990]

Gerade dieses Argument erweist sich bei einer differenzierten Betrachtung als falsch:

- Investitionen in Techniken der rationellen Energieanwendung schaffen mehr Arbeitsplätze als Investitionen in Großkraftwerkstechniken.
- Investitionen in Wärmedämmmaßnahmen, in dezentrale KWK-Anlagen, in effiziente Heizungssysteme etc. schaffen regional verteilte Arbeitsplätze, besonders im Bereich der mittelständischen Industrie, beim Gewerbe und beim Handwerk. Diese Aussage wird z. B. in einer Studie für die Stadtwerke Bremen [BEB 1989] bestätigt.
- In der jetzigen ökonomischen Situation der DDR bedeuten Investitionen, die für die Fertigstellung der Blöcke 5-8 in Greifswald und der Blöcke 1 und 2 in Stendal aufgebracht werden, nicht nur eine riesige Fehlinvestition, da diese Kraftwerksbauten, die bereits mit Schulden in Milliardenhöhe belastet sind, mit großer Wahrscheinlichkeit aus Sicherheitsgründen nie in Betrieb gehen werden. Sie bedeuten darüberhinaus einen schweren Verlust für die gesamte Energiewirtschaft, da diese Mittel nicht mehr für Investitionen der rationellen Energienutzung oder für Investitionen in der kommunalen Energiewirtschaft zur Verfügung stehen.

Die Nutzung der Potentiale der rationellen Energieanwendung setzt eine entsprechende Zielsetzung bei den Energieunternehmen voraus: Der Aufbau von kommunalen Energieversorgungsunternehmen muß unter der Zielsetzung eines Energiedienstleistungsunternehmens erfolgen. Statt dem Verkauf von Energieträgern müssen das strategische Energiesparen, die planmäßige Erfassung von Einsparmöglichkeiten, die rasche Erschließung der Einsparpotentiale im Vordergrund stehen.

*Kommunen brauchen EVU um andere Aufgaben erfüllen zu können*

Die Kommunen der DDR stehen heute vor einer schwierigen Situation, die durch die unterschiedlichsten Anforderungen gekennzeichnet sind. Der Aufbau einer funktionierenden Kommunalverwaltung steht dabei mit an erster Stelle. Aber auch die Bereitstellung von Dienstleistungen im Abfallsektor, in der Trinkwasserversorgung, dem öffentlichen Verkehr etc. stehen zur Lösung an. Weiterhin ist in vielen Kommunen die Altlastensanierung ein wichtiges Problem, das aus ökologischen und gesundheitlichen Gesichtspunkten schnell gelöst werden muß.

Zur Lösung dieser Probleme bieten sich ebenfalls kommunale Werke an, die über das nötige technische Wissen verfügen. Gerade im kommunalen Querverbund, der als Eigenbetrieb der Kommune geführt wird, sind die verschiedenen Tätigkeiten oftmals rationell miteinander verknüpfbar. Besonders wichtig für die Kommunen ist, daß sie die Gebiete der nichtrentierlichen Investitionen (z. B. Altlastensanierung) mit rentierlichen Tätigkeiten z. B. in der Energiebereitstellung verknüpfen können.

Die o. g. Kommissionsmitglieder sind sich der Probleme bewußt, die durch die Koppelung der Gewinnmöglichkeiten aus dem Energiegeschäft mit anderen oftmals defizitären Kommunalaufgaben entstehen. Der Zwang der Gewinnmaximierung durch den Energieträgerverkauf der Stadwerke kann aber durch eine entsprechende Struktur und Aufgabendefinition dieser Unternehmen beschränkt werden. Weiterhin muß durch eine ausreichende Gemeindefinanzierung (z. B. Gewerbesteuer) den Kommunen eine finanzielle Grundlage für ihre vielfältigen Aufgabengebiete geschaffen werden. So kann etwa am Beispiel der Stadtwerke Rottweil nachgewiesen werden, daß durch Investitionen in rationelle Nutzungstechnologien (z. B. Nutzwärmeconcept) einerseits Gewinne erzielt werden können, andererseits ein wesentlicher Beitrag zur Umweltentlastung erbracht werden kann.

Es kann aber im Gegenzug nicht akzeptiert werden, daß z. B. die Altlastensanierungen, die in den meisten Fällen „tote“ Investitionen sind, den Kommunen und anderen öffentlichen Trägern überlassen werden, die gewinnträchtigen Geschäfte aber von privatwirtschaftlichen Gesellschaften übernommen werden. Der Stromvertrag zwischen den drei großen Verbund-EVU und der DDR-Regierung sieht einerseits eine Kostenerstattungsgarantie (versteckte Gewinngarantie) vor, andererseits sollen die neuen Stromversorgung von der Beseitigung der Altlasten befreit werden.

Der *Aufbau von kommunalen Werken* sollte nach den Ergebnissen der Studie *im Vordergrund der kommunalen Bemühungen stehen*. Da dies sicher nicht in allen Kommunen erreichbar ist, muß die Übertragung der Aufgaben an Dritte delegiert werden und ein Konzessionsvertrag zwischen einem Unternehmen und der Kommune abgeschlossen werden. In diesem Fall muß aber die Strategie der Kommunen sein, sich zuerst über die Ziele der zukünftigen Energiepolitik in der Kommune zu verständigen, um dann mit entsprechenden Partnern in Verhandlungen zu treten. Um eine qualifizierte Entscheidung über die zukünftige Energieversorgung in einer Kommune treffen zu können, ist die *Erarbeitung eines Energiekonzepts* notwendig. Werden Konzessionsverträge abgeschlossen, so sind nicht nur die formalen Punkte der Geschäfte zu vereinbaren, sondern insbesondere die inhaltliche Gestaltung der zukünftigen Energiewirtschaft zu beachten. Als Beispiel dafür kann der *Konzessionsvertrag* zwischen der Gemeinde Rehlingen-Siersburg und den Vereinigten Saar Elektrizitätswerken gelten, bei dem die Realisierung von konkreten Projekten aus dem Energiekonzept (z. B. die Realisierung von drei Wasserkraftwerken) vereinbart wurde. Für den Abschluß von Konzessionsverträgen ist davon abweichend zu empfehlen, daß die Laufzeit auf maximal 10 Jahre begrenzt wird und insbesondere in den Endchaftsbestimmungen der Restwert (nicht Sachzeitwert) für die Übernahme des Netzes vereinbart wird. Eine Laufzeit von unter 10 Jahren ist insbesondere unter den derzeitigen, sich ständig verändernden Rahmenbedingungen in der DDR sinnvoll. Die Forderungen nach möglichst langen Laufzeiten von Seiten der EVU ist dabei nicht relevant, da diese bei einer etwaigen Netzübernahme durch die Kommune ihr investiertes Kapital plus Verzinsung erstattet bekommen.

Eines muß immer im Vordergrund der Verhandlungen stehen: Die *Kommune hat ein weitgehendes Bestimmungsrecht* über die Tätigkeiten von Unternehmen bei der Verrichtung von öffentlichen Aufgaben auf ihrem Gemeindegebiet – nicht die Unternehmen haben das Recht zu bestimmen. Grundsätzlich ist die Forderung zu stellen, daß alle Vereinbarungen und Verträge zwischen Kommunen und Unternehmen, die nicht auf einem gültigen Beschluß der demokratisch gewählten Gemeinde- oder Stadträte beruhen, rechtsunwirksam sind.

## 5.4 Günstige rechtliche Rahmenbedingungen in der DDR schaffen

### 1. Energiewirtschaftsgesetz

Mit dem Vollzug der Wiedervereinigung wird das Energiewirtschaftsgesetz auch für das jetzige DDR-Gebiet gelten. Damit wird ein Gesetz übertragen, das in sehr starkem Maße dazu beigetragen hat, die kommunale Energieversorgung zu unterbinden und die rationelle Energieanwendung (z. B. Kraft-Wärme-Kopplungsanlagen) zu be- und verhindern. Zudem wurden im Rahmen der energiewirtschaftlichen Überprüfung von Genehmigungsanträgen für neue Kraftwerke bislang lediglich die Kosten der Erzeugungsseite betrachtet. Es wurde und wird jedoch im Rahmen des Genehmigungsverfahrens nicht geprüft, ob ein bestimmter zuwachsender Strombedarf durch den Bau von sogenannten „Mega-Watt-Kraftwerken“ (Maßnahmen der rationellen Stromnutzung, die nachhaltig zu Stromeinsparungen führen) wirtschaftlicher und umweltschonender abgedeckt werden kann.

*Nicht die Übernahme sondern die Novellierung des Energiewirtschaftsgesetzes ist deshalb dringend notwendig.*

Die o. g. Kommissionsmitglieder treten für die Einführung einer energiepolitischen Regulierung ein, wie sie sich derzeit in den Vereinigten Staaten von Amerika immer stärker durchsetzt: dem Least-Cost Planning-Ansatz (LCP). Der Grundgedanke des LCP ist einfach und auch in der wissenschaftlichen Diskussion unumstritten: Das Stromversorgungsunternehmen wendet diejenigen Versorgungsmöglichkeiten für Energiedienstleistungen vorrangig an, die am kostengünstigsten sind. Der Begriff Least-Cost Planning läßt sich somit sinngemäß am besten mit „energiedienstleistungsorientierte Minimalkostenplanung“ übersetzen. Im Gegensatz zur früheren amerikanischen Regulierungspraxis und auch im Gegensatz zur vorherrschenden Planungs- und Regulierungspraxis in der Bundesrepublik Deutschland werden in dieses Konzept alle Maßnahmen der rationellen Stromnutzung miteinbezogen. Das heißt: Kann das EVU über ein planmäßig durchzuführendes Einsparprogramm Stromverbrauch einsparen, so werden die Kosten für die eingesparte kWh ermittelt und mit den Kosten einer zusätzlichen Erzeugung (pro kWh) verglichen. Die Einzigartigkeit dieses Ansatzes besteht darin, daß er Angebotsoptionen wie ein neues Kraftwerk oder Leitungstrassen nicht trennt von nachfrageseitigen Optionen wie Energieeinsparung. Stattdessen werden innerhalb des LCP-Ansatzes alle Optionen auf einer einheitlichen Grundlage bewertet.

Beim Vergleich von erzeugtem Strom mit „Einsparstrom“, müssen neben den Kosten für das Kraftwerk und den Brennstoffe auch die Systemkosten (z. B. anteilige Reservehaltung, Leitungskosten, Leitungsverluste) sowie die quantifizierbaren Umweltkosten berücksichtigt werden. Auf der Seite des „Einsparstroms“ müssen auch die Kosten für die Durchführung der Dienstleistungsprogramme (z. B. Beratung, Finanzierung, Prämien, Informationskosten) in die Kalkulation mit einbezogen werden. Für die Ermittlung der „live cycle costs“ (also die durchschnittlichen Kosten der Stromgewinnungsmaßnahme ermittelt über die gesamte Lebensdauer der Maßnahme) müssen dabei für alle Ressourcen die gleichen Parameter (Zinssatz, Entwicklung der Energiepreise) zugrundegelegt werden. Die Einführung eines solchen Ansatzes würde sowohl in der DDR als auch in der Bundesrepublik zu einer Reduzierung der Kosten für die von den Kunden gewünschten Energiedienstleistungen führen. Die Einführung des LCP-Verfahrens ist gerade in der jetzigen Aufbau-Situation in der DDR dringend notwendig.

### 2. Preisaufsicht

Die Preisaufsicht, die in der Bundesrepublik bei den Landeswirtschaftsministerien liegt und die Aufgabe hat, die Gewinne der Versorgungs-Monopole zu kontrollieren, kann diese Aufgabe nicht erfüllen. Dies drückt sich unter anderem durch die überquellenden Kassen und die rege Aufkaufstätigkeit der Energieversorgungsunternehmen aus.

Notwendig ist im Zusammenhang mit dem Least-Cost Planning-Ansatz eine funktionierende Energie- und Preisaufsicht für beide Teile Deutschlands einzuführen, die zudem öffentlichen Charakter haben muß.

### 3. Preisgestaltung/Tarifordnung

Die Energieträger Strom und Fernwärme sind derzeit in der DDR hoch subventioniert. Diese Subventionen müssen im Laufe weniger Jahre völlig abgebaut werden.

Die Übernahme der erst zu Jahresbeginn novellierten BTOelt würde für die DDR, in der Haushalts- und Kleingewerbekunden über einen quasilinearen Stromtarif versorgt wurden, einen Rückschritt bedeuten. (Nach den bisherigen Erkenntnissen werden die Mehrzahl der EVU das Mainzer Modell und somit einen absatzfördernden Grundpreistarif einführen).

Die o. g. Kommissionsmitglieder empfehlen deshalb für eine erneute Novellierung der Bundestarifordnung Elektrizität und fordern einen einheitlichen linearen, zeitvariablen Tarif für alle Kundengruppen.

### 4. Rückgabe von Kraftwerken und Netzen in die Hände der Kommune

Gemäß dem Treuhandgesetz soll das Eigentum an den Anlagen der Energie- und Wasserversorgung wieder an die Städte und Landgemeinden im heuti-

gen DDR-Gebiet übertragen werden. Erforderlich ist die schuldenfreie Rückgabe aller Anlagen und Netze um die Voraussetzungen für den Aufbau kommunaler Querverbundunternehmen zu schaffen. Die Erlöse aus dem Energiesektor werden benötigt, um andere defizitäre Bereiche abdecken zu können. Längerfristig ist jedoch eine Entkoppelung von Gemeindefinanzierung und Energiegeschäft notwendig.

#### 5. Erstellung von Energiekonzepten

Die systematische Abwärmenutzung, die Erschließung der Einsparpotentiale und die Nutzung regenerativer Energiequellen setzt die Durchführung von handlungsorientierten Energiekonzepten voraus. In den Energiekonzepten muß vor allem die Möglichkeit der Fernwärmeversorgung geprüft werden, damit die zu erwartende schnelle Umstellung der Heizungen auf Gas und Öl eine Stromerzeugung in KWK-Anlagen nicht blockiert.

Um eine solche Blockade zu verhindern, sollte sowohl in der DDR als auch in der BRD ein Ausbau der Gasversorgung nur nach vorheriger Prüfung der Einsatzmöglichkeit eines Wärmeversorgungssystems auf der Basis von Kraft-Wärme-Kopplung genehmigt werden. Ist eine Nahwärmeversorgung wirtschaftlich tragfähig, so ist diese Lösung aus ökologischen Gründen und aus Gründen der Ressourcenschonung der Vorzug zu geben.

#### 6. Abbau der Subventionierung von Energieträgern

Bis Ende 1990 werden in der DDR neben Strom und Fernwärme auch Gas und Kohle für Endverbraucher stark subventioniert. Diese Subventionen müssen abgebaut und die Preise der Energieträger auf das Kostenniveau angehoben werden. Nach Abschluß des Anpassungsprozesses ist auf die Energieträger zusätzlich eine Primärenergiesteuer zu erheben, um die externen Kosten der Energieverwendung abzudecken. Die Mehreinnahmen sind zweckgebunden für die Förderung der rationellen Energienutzung zu verwenden.

Bei der Preisumstellung sind insbesondere auch soziale Aspekte zu berücksichtigen. Dies kann zum einen durch gezielte, geförderte Energiesparprogramme für besondere Problemgruppen sowie durch eine (zumindest teilweise) Kompensation bei den Einkommen erfolgen.

#### 7. Einspeisepreise

Die in der BRD bestehenden Einspeisepreise gemäß der Verbändevereinbarung VDEW/VIK/BDI entsprechen nicht den vermiedenen Kosten einer alternativen Erzeugung. Dennoch werden diese Einspeisepreise im Vertrag der drei Verbund-EVU auch für die Versorgungsgebiete der DDR übernommen werden. Damit wird die Wirtschaftlichkeit von Investitionen zur Umstellung der Heizwerke auf Heizkraftwerke wesentlich verschlechtert.

#### 8. Verbrauchsstandards für Haushaltsgeräte

Für Haushaltsgeräte sind Höchstverbrauchsstandards einzuführen. Energiehöchstverbrauchsstandards, die den Maximalverbrauch der Haushaltsgeräte bei Normbedingungen festlegen, haben gegenüber Anreizen (z. B. Gewährung von Prämien für marktbeste Geräte) den Vorteil, daß sie bundesweit und generell, d. h. bei allen Haushalten wirken.

#### 9. Stromkosten-Kennzeichnungspflicht

In der Bundesrepublik besteht zwar für die großen Haushaltsgeräte eine Kennzeichnungspflicht für den Stromverbrauch, doch ist die Produktinformation, die der potentielle Käufer über den orangenen Aufkleber bekommt, kaum zu gebrauchen. So wird z.B. bei einem Kühlschrank der Stromverbrauch pro Tag in kWh angegeben. Die meisten Verbraucher sind jedoch überfordert, aus diesen Angaben die durch das Gerät verursachten Stromkosten über die Lebensdauer des Gerätes zu errechnen.

In den USA ist eine entsprechende Kennzeichnung seit Anfang der 80er Jahre Pflicht. Der sogenannte „Energyguide“, der auf den Haushaltsgeräten (Kühlschrank, Geschirrspülmaschine, Waschmaschine, Trockner, Klimaanlage, etc.) kleben muß, zeigt die Stromkosten für den Betrieb des Gerätes über ein Jahr an. Zum Vergleich werden die Stromkosten für das marktbeste und das Gerät mit den höchsten Stromkosten in der Skala angezeigt.

#### 10. Weitere Verbesserungen

Neben den bereits skizzierten Veränderungen sind weitere Maßnahmen notwendig:

- Die Heizkostenabrechnung von Mietwohnungen sind verbrauchsabhängig zu gestalten. Dies setzt allerdings den Einbau entsprechender Wärmezähler voraus.
- Verschärfung der Wärmeschutzverordnung für Neu- und Altbauten: die für die Bundesrepublik geltende Wärmeschutzverordnung entspricht nicht mehr dem Stand der Technik und auch nicht den Anforderungen, die an eine klimaschonende Bauweise gestellt werden müssen. Die Wärmeschutzverordnung aus dem Jahr 1982 muß deshalb verbessert und für das gesamte Gebiet des vereinigten Deutschlands Gültigkeit erlangen.
- Offensive Informationspolitik bezüglich der rationellen Energienutzung; Beteiligung der Öffentlichkeit bei der Energieplanung und Umsetzung von Programmen zur rationellen Energienutzung

#### 5.5 Spezielle Maßnahmen für regenerative Energiequellen

Der Ausbau erneuerbarer Energiequellen auf ein für die DDR energiewirtschaftlich relevantes Maß erfordert ein Bündel an Maßnahmen, die im folgenden kurz umrissen werden:

**Ausbildung:** Der Informations- und Ausbildungsstand über die Nutzungsmöglichkeiten von erneuerbaren Energiequellen ist in der DDR, wie im übrigen auch in der BRD, noch gering. Die Ausbildung von Handwerk, Ingenieuren, Architekten, Planern und Technikern im relevanten Bereich ist daher auf allen Ebenen drastisch zu erhöhen. Hierbei bieten sich folgende Ansatzpunkte an: eigene Studiengänge für Nutzung erneuerbarer Energiequellen, Vortragsveranstaltungen, Seminare für interessierte Nutzer, Fortbildungsseminare für Handwerker, Modifikation der Ausbildungsinhalte und der Berufsbilder bei einschlägigen Handwerksberufen.

**Imagepflege:** In der DDR wurde bislang die Bedeutung der regenerativen Energieträger noch stärker heruntergespielt als in der BRD. Deshalb sind allgemeine Informationen über die Nutzungsmöglichkeiten und die Vorteile regenerativer Energiequellen notwendig, um die bestehenden Vorurteile zu korrigieren und die vorhandenen Einstellungen zu verändern.

**Energiekonzepte:** Die Potentiale der regenerativen Energiequellen sind im Rahmen von Energiekonzepten zu ermitteln und Maßnahmen zur Umsetzung auszuweisen.

**Prüfung bei Sanierungsarbeiten:** Bei anstehenden Sanierungsarbeiten sollte der Einsatz von Solarenergie zur Warmwasserbereitung und Raumheizung geprüft werden. Hier wäre es Aufgabe der kommunalen Energieversorgungsunternehmen, entsprechende Beratungsangebote und Hilfestellungen (Kredite, Beratung über Zuschüsse, Einholen von Angeboten) den Kunden anzubieten. Die Stadtverwaltung ihrerseits hat die Aufgabe, dafür Sorge zu tragen, daß die Bauherren über das Angebot informiert werden.

**Einspeisevergütungen:** Die Einspeisevergütungen für Strom aus erneuerbaren Energiequellen sind auf 20 bis 25 Pf/kWh anzuheben, womit zum einen die Kapazitätseffekte der erneuerbaren Energiequellen zum anderen die vermiedenen sozialen Kosten, die bei der Nutzung fossiler Energiequellen entstehen, vergütet werden.

**Bildung von Interessensgruppen:** Wind- und Wasserkraftanlagenbesitzer sollten sich zur Wahrung und Formulierung ihrer Interessen (Einspeisevergütungen etc.) in Interessensverbänden zusammenschließen.

**Pilot- und Demonstrationsprojekte:** Die Gemeinde sollten durch den Bau von Pilot- und Demonstrationsanlagen einen Beitrag zur Marktdurchsetzung der regenerativen Energiequellen leisten. Hierbei eignen sich insbesondere Gebäude mit häufigem Publikumsverkehr sowie Schulen.

**Förderprogramme:** Durch Finanzierungshilfen (z. B. zinsvergünstigte Kredite in Kooperation mit Sparkassen), durch spezielle Beratungs- und Wartungsangebote soll die Markteinführung von Technologien zur Nutzung regenerativer Energiequellen beschleunigt werden. Auch die bivalente solare Warmwasserbereitung im Rahmen von Nutzwärme Konzepten soll mit entsprechenden Förderprogrammen vorangetrieben werden.

**Aufbau eigener Produktionskapazitäten:** Durch gezielte Fördermaßnahmen soll der Aufbau einer Kollektorindustrie sowie Produktionskapazitäten für Windkraftanlagen in der DDR beschleunigt werden.

**Bauleitplanung:** Durch eine Bauleitplanung, die den Aspekt der passiven und aktiven Solarenergienutzung berücksichtigt, sollen die Grundvoraussetzung für die Solarenergienutzung verbessert werden.

## 6. Förderung der kommunalen Energieversorgung

Der Aufbau kommunaler Stadtwerke mit dem Ziel, die rationelle Energienutzung vor Ort voranzutreiben, ist — wie die Praxis zeigt — auch in der Bundesrepublik kein einfaches Unterfangen. Im Falle der DDR stellt sich die Situation zumindest in einem Punkte noch schwieriger dar: Die notwendigen finanziellen Mittel für Investitionen in die teilweise desolaten Netze und in den Bau von Anlagen der Kraft-Wärme-Kopplung sowie der rationellen Energienutzung sind für die Kommunen in der DDR noch schwieriger aufzubringen als für westdeutsche Städte.

Folgende Maßnahmen sind geeignet die Umsetzung der kommunalen Energieversorgung zu beschleunigen, bzw. zu ermöglichen:

- Den Kommunen sind die Anlagen und Komponenten, die zur Übernahme der Versorgung auf dem Gemeindegebiet nötig sind, schuldenfrei zu übergeben.
- Die regionalen und überregionalen Systemkomponenten der Energieversorgung werden in eine oder mehrere Gesellschaften eingebracht, in denen die Kommunen die Mehrheit besitzen, in denen aber auch die Bezirke und Länder beteiligt werden sollen.
- Ein zu gründender Aufbaufonds vergibt Kredite und Zuschüsse für Maßnahmen der rationellen Energienutzung in der BRD und in der DDR sowie für den Aufbau kommunaler Stadtwerke. Der Fonds soll aus folgender Quelle gespeist werden: Derzeit werden bei nahezu allen Verbund-EVU die Strompreise für Sondervertragskunden gesenkt oder es steht eine Senkung bevor. Die Preissenkung sollte nicht durchgeführt und die dadurch freiwerdenden Mittel von der Preisaufsichtsbehörde abgeführt werden und in den Aufbau dieses Fonds fließen. Damit könnte einerseits zum Aufbau von Energiedienstleistungsunternehmen in der DDR beigetragen werden, andererseits könnte ein stärkerer Anreiz zur rationellen Energienutzung in der BRD geschaffen (höhere Preise bzw. keine Preissenkung) werden.
- Es ist nicht Ziel der Kommunalisierungs-Strategie, den Kapitalzufluß und die Beteiligung von westdeutschen EVU zu verhindern. Deshalb schlagen die o. g. Kommissionsmitglieder vor, daß z. B. die kommunalen Werke gemeinsam mit anderen EVUs oder Anlagenhersteller Betreibergesellschaften gründen, z. B. zum Bau und Betrieb von KWK-Anlagen. Eine verlässliches Investitionsklima kann durch die Vereinbarung von langfristigen Verträgen erreicht werden, die über faire Endschaftsbestimmungen verfügen. Mit dieser Art der Investition in Anlagen kann die Kommune Kapital von Dritten

mobilisieren, ohne daß sie dadurch die Hoheit über die Zielbestimmung der Geschäftspolitik der kommunalen Werke verliert. So haben sich z. B. bereits mehrere Firmen bereit erklärt, vorhandene Heizwerke auf Kraftwärmekopplung umzurüsten. Die Investoren wären bereit die Investitionen in vollem Umfang selbst zu tragen, sofern sie an den Mehrerlösen durch die Einspeisung von Strom mit einem angemessen Betrag beteiligt werden.

Der obige Vorschlag ist auch analog auf die Verbundstufe und die Großkraftwerke zu übertragen. In den Fällen, in denen Investitionsbedarf in Anlagen besteht, kann eine entsprechende Gesellschaft gegründet werden, an der sich westdeutsches Kapital beteiligen kann.

- Für Investitionen im kommunalen Bereich bieten sich aber auch die vielen klassischen Möglichkeiten der Kreditfinanzierung, der Finanzierung über Bausparkassen oder das Anlagenleasing an. Bei der Kreditfinanzierung können die Kommunen vor allem auch auf die Mittel der Kreditanstalt für Wiederaufbau in Frankfurt, das ERP-Programm zurückgreifen, die Modernisierungs- und Umweltschutzinvestitionen finanzieren. Im Falle von wirtschaftlich rentablen Investitionen ist die Kapitalbeschaffung auf dem freien Kapitalmarkt auch durch die Kommunen möglich. Insbesondere unter dem Verschuldungsaspekt sind die Möglichkeiten des Leasings von Anlagen durch die Kommunen zu berücksichtigen.
- Initiativen wie die des hessischen Wirtschaftsministeriums, das organisatorische und finanzielle Hilfen bei der Erstellung von Energiekonzepten in Gemeinden und Regionen des Landes Thüringen leistet, sind zu unterstützen.
- Alle bundesdeutschen Städte auf, den Partnerstädten durch finanzielle Mittel sowie durch organisatorische Hilfen und durch die Vermittlung von Erfahrungen beim Aufbau eigener Stadtwerke und bei der Erarbeitung von Energiekonzepten zu unterstützen (z. B. Stadtwerke Bremen mit Rostock).
- Das Saarland hat einen Vorschlag einer Initiative der Bundesländer zur Neuorganisation der DDR-Energiewirtschaft vorgelegt. Diese Initiative sieht statt dem Verkauf der gesamten Energiewirtschaft der DDR an drei BRD-Energiekonzerne vielfältige, dezentrale Engagements unterschiedlicher westdeutscher Energieversorgungsunternehmen in Form von Minderheitsbeteiligungen oder paritätischen Beteiligungen vor. Hierdurch soll die Energiewirtschaft der DDR saniert und auf den technisch ökonomischen Stand gebracht werden. Die Selbständigkeit der 15 Regionalunternehmen soll erhalten bleiben. Die Unternehmen sollen die Möglichkeit haben, ihre westdeutschen Partner wählen zu können und gemeinsam mit größeren DDR-Kommunen und gegebenenfalls mit westdeutschen Regionalunternehmen und Stadtwerken kommunale Werke in der DDR zu gründen. Diese Initiative sollte fortgesetzt werden, weil sie für eine pluralistische Energiewirtschaft im Gebiet der DDR unabdingbar ist. Dabei könnte weit mehr Kapital in die DDR fließen als im Rahmen des bekanntgewordenen Verkaufsvertrages vorgesehen ist.

- Auf Landesebene sollten mit einer Anfangs-Unterstützung der Länder und des Bundes Energie-Agenturen gegründet werden. Diese Energie-Agenturen haben die Aufgabe, Potentiale der rationalen Energienutzung vor allem im gewerblichen Bereich zu erschließen und in eigener Regie umzusetzen. Schwierigkeiten in der Anfangsphase sind allerdings derzeit noch darin zu sehen, daß die Energiepreise bis Anfang 1991 festgeschrieben und dann in Stufen auf das tatsächliche Kostenniveau gebracht werden. Dadurch werden die Möglichkeiten der Energie-Agenturen, in der Aufbauphase auf wirtschaftlicher Basis zu arbeiten, wesentlich eingeschränkt.
- Aufgrund der bislang vorherrschenden zentralen Planung und Aufgabenteilung zwischen Energiekombinat und den Gemeinden, verfügen die Gemeinden in der DDR heute in der Regel nicht über die notwendigen Informationen zum Aufbau einer unter ökonomischen und ökologischen Gesichtspunkten optimierten kommunalen Energieversorgung. Eine von wirtschaftlichen Interessen unabhängige Grundlageninformation ist deshalb dringend notwendig. Darüberhinaus sollten die Gemeinden über einen speziellen Informationsdienst über aktuelle Entwicklungen auf dem Gebiet der Energiewirtschaft und des Energierechts informiert werden.

## V. Nachbemerkung

Die o. g. Kommissionsmitglieder weisen darauf hin, daß auch der zukünftigen Verkehrspolitik auf dem Gebiet der ehemaligen DDR eine besondere Bedeutung für den Umwelt- und Klimaschutz zukommt. Heute besteht noch die Möglichkeit, die Weichen in Richtung für eine umweltverträglichere und effiziente Verkehrsinfrastruktur zu stellen. Das erfordert eine eindeutige Priorität zugunsten der öffentlichen Verkehrssysteme sowohl im kommunalen Bereich auch bei der bisherigen Reichsbahn.

Das DDR-Eisenbahnnetz ist in einem sehr schlechten Zustand. Gleise und Gleisanlagen sind verbraucht, notwendige Modernisierungsmaßnahmen sind unterblieben. Rund ein Drittel sind wegen lange überfälliger Bauarbeiten extreme Langsamstrecken, die Züge und Waggons sind überaltert. Derzeit gibt es keine verlässliche Kostenberechnung über die Sanierung der Verkehrsinfrastruktur in der ehemaligen DDR. Das dortige Verkehrsministerium hatte die Investitionssumme zuletzt auf mindestens 100 Mrd. DM veranschlagt.

Ein funktionsfähiges, an ökologischen Zielen ausgerichtetes Gesamtverkehrssystem im vereinigten Deutschland ist eine wesentliche Voraussetzung für eine wirksame Klimaschutzpolitik. Im Votum zu Abschnitt D haben die o. g. Kommissionsmitglieder dazu bereits eine Ziel- und Maßnahmenkatalog aufgestellt. Für die Gebiete der ehemaligen DDR ist darüber hinaus ein der Situation angepaßtes Finanzierungskonzept erforderlich, um die Schlüsselinvestitionen in die Neuordnung des Verkehrssystems zu ermöglichen. Die Erhöhung der Mineralölsteuer kann dabei gezielt für derartige Maßnahmen eingesetzt werden.

## ABSCHNITT F

### Internationale Strategie zur Reduktion energiebedingter klimarelevanter Spurengasemissionen

Neben nationalen Maßnahmen, wie sie im vorangehenden Abschnitt E am Beispiel der Bundesrepublik Deutschland erörtert wurden, muß, damit der zusätzliche Treibhauseffekt eingedämmt wird, vor allem eine international abgestimmte Strategie zur Verringerung der Emission energiebedingter klimarelevanter Spurengase entwickelt werden.

In keinem der Politikbereiche, die von der Aufgabe betroffen sind, diese Emissionen zu verringern, ist ein allein nationales Handeln einzelner oder weniger Staaten ausreichend. Die Spurengase werden – wenn auch in sehr unterschiedlichem Ausmaß – in allen Ländern emittiert. Die klimarelevanten Kohlendioxidemissionen des Energiesektors, die zu etwa 40 Prozent für den zusätzlichen Treibhauseffekt verantwortlich gemacht werden, sind folgendermaßen regional verteilt:

Die westlichen Industriestaaten der Organisation für wirtschaftliche Zusammenarbeit und Entwicklung (Organization for Economic Cooperation and Development, OECD) emittierten 1986 etwa 50 Prozent, die Länder Osteuropas und die Sowjetunion etwa 25 Prozent. Der verbleibende Anteil wird – vor allem infolge des steigenden Energiebedarfs verschiedener Dritte-Welt-Staaten, darunter die Volksrepublik China mit einem Anteil von 13 Prozent an den globalen Emissionen – von den Entwicklungsländern emittiert. Drei Staaten, die USA, die UdSSR und die Volksrepublik China, sind 1986 für mehr als 50 Prozent der

durch die Verbrennung fossiler Energieträger bedingten Kohlendioxidemissionen verantwortlich gewesen (vgl. Abb. 1).

Für die künftige internationale Vorgehensweise ist die regionale Verteilung der Spurengasemissionen von entscheidender Bedeutung. Aus ihr ergibt sich, daß einzelne Staaten zwar wichtige Beiträge leisten können, aber letzten Endes kein Staat und keine Region aus eigener Kraft in der Lage ist, die global notwendige Reduzierung der Emissionen alleine zu erreichen (vgl. Tab. 1).

Diese Aussage wird noch dadurch verstärkt, daß sich in Zukunft die Gewichte zwischen den Weltregionen weiter verschieben werden, wie dies in der Tendenz bereits jetzt deutlich sichtbar ist. Diese Verschiebung ist die Folge des steigenden Energiebedarfs der Entwicklungsländer.

Im weiteren wird zunächst dargestellt, welche Anstrengungen bisher auf internationaler Ebene und in der EG zur Eindämmung des zusätzlichen Treibhauseffektes unternommen wurden. Im Anschluß daran wird im 2. Kapitel ein Lösungskonzept vorgestellt, das nach Auffassung der Enquete-Kommission dazu geeignet ist, durch die Reduktion der Emission energiebedingter klimarelevanter Spurengase die erwarteten Klimaveränderungen einzugrenzen.

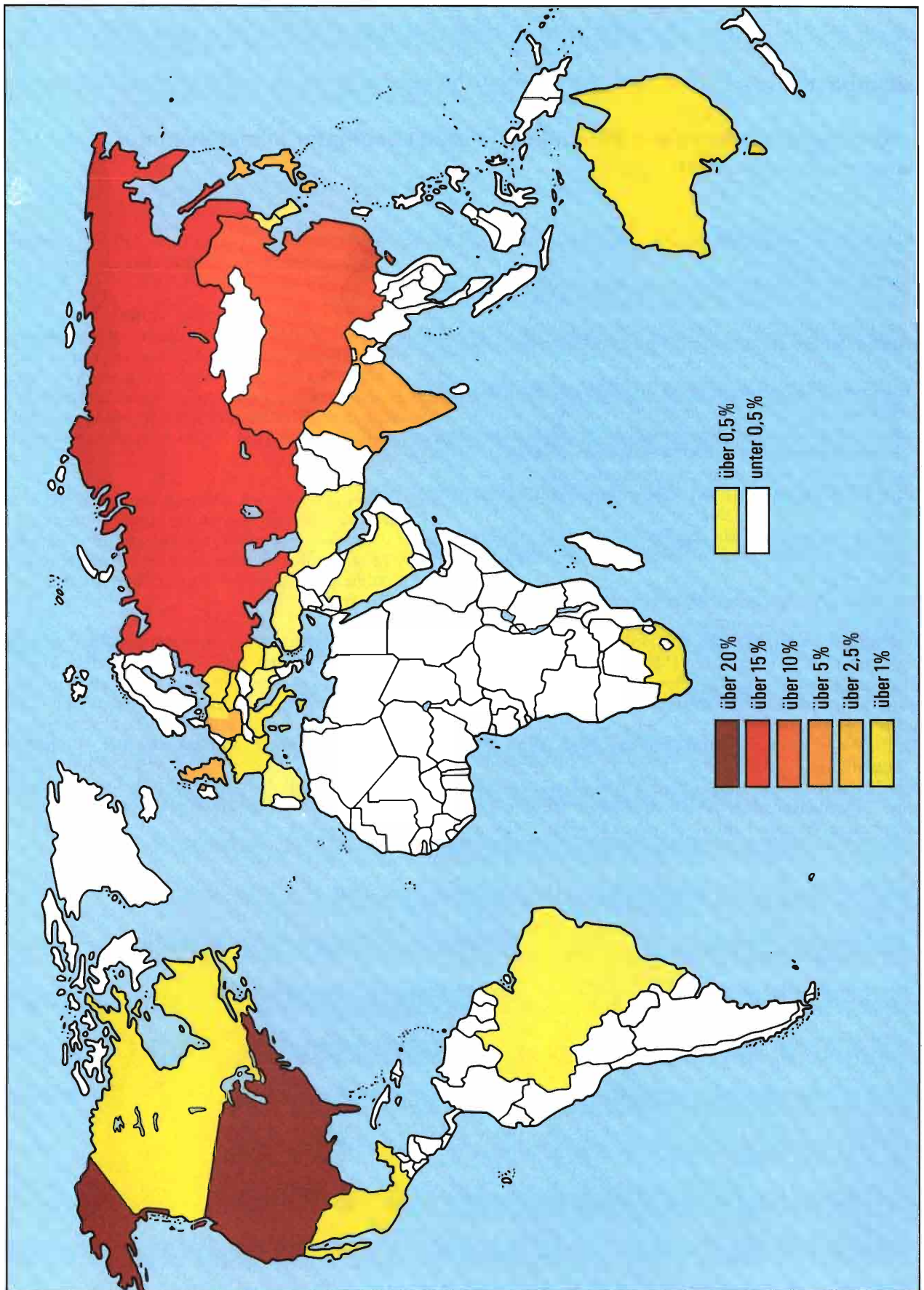


Abb. 1: Prozentualer Anteil einzelner Staaten an den weltweiten energiebedingten Kohlendioxidemissionen im Jahr 1986 (1).



**Energiebedingte Kohlendioxid (CO<sub>2</sub>)-Emissionen in Millionen t CO<sub>2</sub>, Anteile an den weltweiten CO<sub>2</sub>-Emissionen und CO<sub>2</sub>-Emissionen pro Kopf sowie Beiträge der fossilen Energieträger Kohle, Erdöl und Gas zu den gesamten CO<sub>2</sub>-Emissionen für Staaten und abhängige Gebiete (Basisjahr: 1986)  
vgl. zu den Angaben (2)**

Land	CO <sub>2</sub> -Emissionen in Millionen Tonnen					CO <sub>2</sub> /Be t/Einw.
	Kohle	Oel	Gas	Summe	%-Wert	
Verein. Staaten von Amerika . . . . .	1 751,3	2 067,9	946,5	4 765,68	23,76	19,73
Sowjetunion . . . . .	1 487,7	1 036,9	1 212,4	3 736,99	18,63	13,16
China . . . . .	1 785,8	210,5	31,2	2 027,51	10,11	1,89
Japan . . . . .	305,4	513,9	94,4	913,77	4,56	7,50
Bundesrepublik Deutschland <sup>1)</sup> . . . . .	286,1	303,9	125,0	715,00	3,60	11,70
Großbritannien . . . . .	328,9	221,7	125,7	676,39	3,37	11,92
Indien . . . . .	417,8	109,5	12,0	539,27	2,69	0,70
Polen . . . . .	421,1	34,5	22,6	478,15	2,38	12,70
Kanada . . . . .	99,2	214,5	122,0	435,71	2,17	17,03
Frankreich/Monaco . . . . .	93,9	225,3	64,5	383,68	1,91	6,94
Italien/S. Marino . . . . .	57,2	238,5	68,9	364,62	1,82	6,36
Deutsche Demokratische Republik . . . . .	289,7	44,5	18,2	352,46	1,76	21,20
Südafrika . . . . .	264,2	28,5	—	292,75	1,46	7,67
Mexiko . . . . .	18,9	212,1	35,0	265,99	1,33	3,28
Australien . . . . .	129,5	82,8	32,5	244,87	1,22	15,18
Tschechoslowakei . . . . .	187,4	35,3	21,5	244,27	1,22	15,73
Rumänien . . . . .	81,5	40,2	90,7	212,48	1,06	9,17
Niederlande . . . . .	24,9	91,5	86,6	203,01	1,01	13,94
Spanien . . . . .	82,6	99,3	6,7	188,60	0,94	4,88
Brasilien . . . . .	39,5	129,7	6,3	175,48	0,87	1,27
Korea (Süd) . . . . .	91,2	70,5	0,2	161,91	0,81	3,89
Korea (Nord) . . . . .	145,7	10,1	—	155,75	0,78	7,46
Jugoslawien . . . . .	78,4	37,8	12,0	128,26	0,64	5,51
Bulgarien . . . . .	70,2	39,0	13,0	122,17	0,61	13,64
Türkei . . . . .	69,7	47,2	1,0	117,85	0,59	2,34
Belgien . . . . .	36,3	60,1	15,6	111,97	0,56	11,31
Venezuela . . . . .	1,3	55,7	49,4	106,45	0,53	5,98
Iran . . . . .	2,8	83,4	19,2	105,34	0,53	2,36
Saudi Arabien . . . . .	—	84,6	16,6	101,21	0,50	7,44
Argentinien . . . . .	3,7	59,1	35,9	98,61	0,49	3,18
Indonesien . . . . .	6,6	76,0	15,8	98,34	0,49	0,59
Ungarn . . . . .	35,8	24,6	22,3	82,74	0,41	7,80
Dänemark . . . . .	33,7	30,1	2,9	66,62	0,33	13,00
Ägypten . . . . .	3,1	53,3	9,3	65,67	0,33	1,32
Griechenland . . . . .	26,3	31,0	0,3	57,63	0,29	5,78
Österreich . . . . .	15,3	28,8	10,7	54,79	0,27	7,24
Schweden . . . . .	11,9	42,3	0,5	54,62	0,27	6,53
Finnland . . . . .	21,7	28,9	2,4	52,99	0,26	10,75
Algerien . . . . .	3,3	17,3	31,2	51,84	0,26	2,26
Thailand . . . . .	7,1	34,3	7,4	48,84	0,24	0,91
Pakistan . . . . .	6,5	22,5	18,4	47,33	0,24	0,48
Kolumbien . . . . .	13,5	21,8	9,5	44,77	0,22	1,53
Schweiz/Licht. . . . .	2,0	36,5	3,4	41,92	0,21	6,42
Nigeria . . . . .	0,3	27,1	7,0	34,39	0,17	0,35

noch Tabelle 1

Land	CO <sub>2</sub> -Emissionen in Millionen Tonnen					CO <sub>2</sub> /Be t/Einw.
	Kohle	Oel	Gas	Summe	%-Wert	
Malaysia .....	1,2	27,4	4,7	33,32	0,17	2,07
Kuba .....	0,5	31,3	0,0	31,78	0,16	3,09
Norwegen .....	4,9	23,9	2,5	31,32	0,16	7,51
Irland .....	12,9	13,3	3,6	29,82	0,15	8,43
Philippinen .....	5,3	22,9	0,0	28,18	0,14	0,50
Portugal .....	5,5	21,9	—	27,39	0,14	2,66
Kuwait .....	—	12,3	14,9	27,19	0,14	14,52
Libyen .....	0,0	20,4	6,7	27,16	0,14	7,26
Syrien .....	0,0	26,1	0,4	26,55	0,13	2,50
Israel .....	9,4	16,6	0,1	26,16	0,13	5,89
Hong Kong .....	14,3	11,1	—	25,44	0,13	4,60
Singapur .....	0,0	23,3	—	23,32	0,12	9,02
Oman .....	—	18,4	4,0	22,40	0,11	11,20
Chile .....	5,5	14,9	1,9	22,39	0,11	1,80
Irak .....	0,0	20,9	1,4	22,23	0,11	1,35
Ver. Arab. Emirate .....	—	18,8	1,9	20,69	0,10	14,95
Neuseeland .....	4,6	7,8	8,0	20,39	0,10	6,16
Peru .....	0,6	17,9	1,3	19,84	0,10	0,98
Vietnam .....	14,7	4,3	—	19,05	0,09	0,31
Trinidad/Tobago .....	0,0	11,3	6,6	17,94	0,09	14,90
Puerto Rico .....	0,1	17,0	—	17,05	0,09	4,87
Marokko .....	2,9	13,0	0,2	16,06	0,08	0,71
Simbabwe .....	12,0	2,0	—	13,97	0,07	1,66
Ecuador .....	—	12,1	0,2	12,31	0,06	1,28
Bangladesch .....	0,3	4,7	6,7	11,68	0,06	0,12
Bahrain .....	0,0	1,7	9,6	11,32	0,06	27,47
Katar .....	—	2,1	9,2	11,28	0,06	33,66
Tunesien .....	0,2	8,6	1,7	10,53	0,05	1,41
Luxemburg .....	5,0	3,2	0,8	9,04	0,05	24,64
Mongolei .....	6,1	2,6	—	8,65	0,04	4,46
Albanien .....	4,1	3,5	0,9	8,48	0,04	2,81
Jordanien .....	—	8,0	—	7,99	0,04	2,18
Jungferns., Am. .....	—	7,1	—	7,13	0,04	66,59
Birma .....	0,8	3,0	2,4	6,21	0,03	0,16
Dominik. Republik .....	0,0	6,1	—	6,08	0,03	0,95
Libanon .....	0,0	6,0	—	6,00	0,03	2,22
Kamerun .....	0,0	5,9	—	5,91	0,03	0,56
Jamaika .....	0,0	5,6	—	5,58	0,03	2,35
Antillen, Nied. .....	—	4,2	—	4,25	0,02	13,08
Cote d'Ivoire .....	—	4,1	—	4,11	0,02	0,40
Bolivien .....	0,1	3,4	0,5	4,06	0,02	0,62
Zaire .....	0,9	2,6	—	3,53	0,02	0,11
Jemen (Nord) .....	—	3,4	—	3,38	0,02	0,36
Sri Lanka .....	0,0	3,3	—	3,29	0,02	0,20
Brunei .....	0,0	2,4	0,9	3,24	0,02	13,28
Afghanistan .....	0,5	1,3	1,4	3,14	0,02	0,17
Zypern .....	0,2	2,9	—	3,09	0,02	4,59
Guatemala .....	—	3,1	—	3,05	0,02	0,37

noch Tabelle 1

Land	CO <sub>2</sub> -Emissionen in Millionen Tonnen					CO <sub>2</sub> /Be t/Einw.
	Kohle	Oel	Gas	Summe	%-Wert	
Kenia . . . . .	0,3	2,7	—	3,02	0,02	0,14
Sudan . . . . .	0,0	3,0	—	3,01	0,02	0,14
Uruguay . . . . .	0,0	2,8	—	2,81	0,01	0,94
Sambia . . . . .	1,4	1,3	—	2,67	0,01	0,39
Guam . . . . .	—	2,6	—	2,63	0,01	22,63
Jemen (Süd) . . . . .	—	2,6	—	2,63	0,01	1,11
Panama . . . . .	0,0	2,5	0,0	2,48	0,01	1,12
Gabun . . . . .	—	1,9	0,5	2,36	0,01	2,02
Papua Neuguinea . . . . .	0,0	2,2	—	2,18	0,01	0,64
Nicaragua . . . . .	—	2,1	—	2,10	0,01	0,62
Costa Rica . . . . .	—	2,0	—	1,95	0,01	0,73
Senegal . . . . .	—	1,9	—	1,91	0,01	0,29
Honduras . . . . .	0,0	1,7	—	1,73	0,01	0,38
Island . . . . .	0,3	1,4	—	1,72	0,01	7,12
El Salvador . . . . .	—	1,7	—	1,65	0,01	0,34
Kongo . . . . .	—	1,7	0,0	1,65	0,01	0,92
Tansania . . . . .	0,0	1,6	—	1,65	0,01	0,07
Ghana . . . . .	0,0	1,6	—	1,61	0,01	0,11
Paraguay . . . . .	—	1,6	—	1,61	0,01	0,42
Äthiopien . . . . .	0,0	1,6	—	1,57	0,01	0,04
Neu Kaledonien . . . . .	0,5	1,1	—	1,55	0,01	9,94
Angola . . . . .	0,0	1,2	0,3	1,53	0,01	0,17
Guyana . . . . .	0,0	1,4	—	1,43	0,01	1,80
Malta . . . . .	0,4	1,0	—	1,38	0,01	3,59
Bahamas . . . . .	0,0	1,2	—	1,20	0,01	5,08
Somalia . . . . .	—	1,1	—	1,13	0,01	0,24
Mauritius . . . . .	0,3	0,8	—	1,05	0,01	1,02
Guinea . . . . .	—	1,0	—	0,98	0,00	0,16
Mosambik . . . . .	0,2	0,8	—	0,97	0,00	0,07
Nepal . . . . .	0,4	0,5	—	0,91	0,00	0,05
Macao . . . . .	0,0	0,9	—	0,90	0,00	2,30
Suriname . . . . .	0,0	0,9	—	0,90	0,00	2,37
Uganda . . . . .	—	0,8	—	0,83	0,00	0,05
Madagaskar . . . . .	0,0	0,8	—	0,75	0,00	0,07
Réunion . . . . .	—	0,8	—	0,75	0,00	1,39
Barbados . . . . .	0,0	0,7	0,1	0,73	0,00	2,89
Niger . . . . .	0,1	0,6	—	0,70	0,00	0,10
Cook Islands . . . . .	—	0,7	—	0,68	0,00	33,75
Guadeloupe . . . . .	—	0,7	—	0,68	0,00	2,02
Haiti . . . . .	0,0	0,7	—	0,68	0,00	0,13
Liberia . . . . .	—	0,7	—	0,68	0,00	0,30
Martinique . . . . .	0,0	0,7	—	0,68	0,00	2,06
Mauretanie . . . . .	0,0	0,6	—	0,60	0,00	0,31
Polynesien, Franz. . . . .	—	0,6	—	0,60	0,00	3,61
Malawi . . . . .	0,1	0,5	—	0,55	0,00	0,08
Färöer Inseln . . . . .	0,0	0,5	—	0,53	0,00	11,41
Samoa, Amerik. . . . .	—	0,5	—	0,53	0,00	14,58
Sierra Leone . . . . .	0,0	0,5	—	0,53	0,00	0,14

noch Tabelle 1

Land	CO <sub>2</sub> -Emissionen in Millionen Tonnen					CO <sub>2</sub> /Be t/Einw.
	Kohle	Oel	Gas	Summe	%-Wert	
Bermuda . . . . .	0,0	0,5	—	0,45	0,00	8,04
Burkina Faso . . . . .	0,0	0,5	—	0,45	0,00	0,07
Fidschi . . . . .	0,0	0,5	—	0,45	0,00	0,63
Kampuchea . . . . .	0,0	0,5	—	0,45	0,00	0,06
Benin . . . . .	—	0,4	—	0,38	0,00	0,09
Grönland . . . . .	0,0	0,4	—	0,38	0,00	6,94
Mali . . . . .	—	0,4	—	0,38	0,00	0,04
Rwanda . . . . .	—	0,4	0,0	0,38	0,00	0,06
Guayana, Franz. . . . .	—	0,3	—	0,30	0,00	3,57
Togo . . . . .	0,0	0,3	—	0,30	0,00	0,10
Belize . . . . .	—	0,2	—	0,23	0,00	1,32
Dschibuti . . . . .	—	0,2	—	0,23	0,00	0,49
Laos . . . . .	0,0	0,2	—	0,23	0,00	0,05
Tschad . . . . .	0,0	0,2	—	0,23	0,00	0,04
Antigua/Barbuda . . . . .	—	0,2	—	0,15	0,00	1,85
Burundi . . . . .	0,0	0,2	—	0,15	0,00	0,03
Gambia . . . . .	—	0,2	—	0,15	0,00	0,23
Kaimaninseln . . . . .	—	0,2	—	0,15	0,00	6,82
Nauru . . . . .	—	0,2	—	0,15	0,00	18,75
Pazifische Inseln . . . . .	—	0,2	—	0,15	0,00	0,95
Salomonen . . . . .	—	0,2	—	0,15	0,00	0,53
Samoa . . . . .	0,0	0,2	—	0,15	0,00	0,91
Seschellen . . . . .	—	0,2	—	0,15	0,00	2,24
St. Lucia . . . . .	—	0,2	—	0,15	0,00	1,14
West Sahara . . . . .	—	0,2	—	0,15	0,00	0,94
Zentr. Afr. Rep. . . . .	—	0,2	—	0,15	0,00	0,05
Äquatorialguinea . . . . .	—	0,1	—	0,08	0,00	0,19
Dominica . . . . .	—	0,1	—	0,08	0,00	0,97
Grenada . . . . .	—	0,1	—	0,08	0,00	0,66
Guinea-Bissau . . . . .	—	0,1	—	0,08	0,00	0,08
Jungfernins., Br. . . . .	—	0,1	—	0,08	0,00	5,77
Komoren . . . . .	—	0,1	—	0,08	0,00	0,16
Malediven . . . . .	—	0,1	—	0,08	0,00	0,40
St. Kitts/Nevis . . . . .	—	0,1	—	0,08	0,00	1,60
St. Pierre/Miquel. . . . .	0,0	0,1	—	0,08	0,00	12,50
St. Vincent/Grenada . . . . .	—	0,1	—	0,08	0,00	0,71
Tonga . . . . .	0,0	0,1	—	0,08	0,00	0,68
Vanuatu . . . . .	0,0	0,1	—	0,08	0,00	0,52
Wake Inseln . . . . .	0,0	0,1	0,0	0,08	0,00	
Bhutan . . . . .	0,0	0,0	—	0,00	0,00	0,00
Kap Verde . . . . .	0,0	0,0	—	0,00	0,00	0,00
Welt CO <sub>2</sub> -Emission				20 055		

<sup>1)</sup> Der Wert von 715 Mio. t CO<sub>2</sub>-Emissionen für die Bundesrepublik Deutschland bezieht sich auf das Jahr 1987 und wurde im Rahmen des Studienprogramms für die Enquete-Kommission ermittelt und aus Konsistenzgründen auch in dieser Tabelle verwendet. Die internationalen Statistiken weisen für die energiebedingten CO<sub>2</sub>-Emissionen (ohne nichtenergetischen Verbrauch) der Bundesrepublik Deutschland für das Jahr 1986 754 Mio. t aus, was rund 3,7 Prozent des weltweiten Wertes entspricht.

## 1. KAPITEL

## Bisherige internationale und EG-weite Aktivitäten zur Eindämmung des zusätzlichen Treibhauseffektes

Die physikalischen Ursachen des Treibhauseffektes sind schon seit mehr als hundert Jahren bekannt (3). Bereits in den fünfziger Jahren warnten einige Wissenschaftler vor den Folgen einer durch menschliche Aktivitäten bedingten Verstärkung des Treibhauseffektes, dem zusätzlichen Treibhauseffekt (vgl. Abschnitt C). Auslöser für die im weiteren beschriebenen Aktivitäten von Wissenschaft und Politik waren allerdings vor allem Ergebnisse von Untersuchungen seit den frühen siebziger Jahren. Die folgende Darstellung beschränkt sich auf besonders wichtige Aktivitäten.

**1. Internationale Konferenzen, Programme und Berichte**

Die internationalen Bemühungen um eine Eindämmung beziehungsweise Vermeidung des zusätzlichen Treibhauseffektes setzten im wesentlichen mit wissenschaftlichen Fachkonferenzen ein. Erst in einem zweiten Schritt, der erfolgte, nachdem sich die Klimaforscher bereits weitgehend darüber einig waren, daß sich der zusätzliche Treibhauseffekt bereits auswirkt, folgten politische Konferenzen im Wechsel mit weiteren Fachtagungen.

Tabelle 2

**Internationale Konferenzen und Vereinbarungen zur Eindämmung des zusätzlichen Treibhauseffektes seit 1979 (Auswahl)**

12. bis 23. Februar 1979	1. Weltklimakonferenz in Genf
Mai 1979	Gründung des Welt-Klimaprogramms
13. November 1979	Übereinkommen über weiträumige grenzüberschreitende Luftverunreinigung
1985	1. Klimakonferenz von Villach
22. März 1985	Wiener Übereinkommen zum Schutz der Ozonschicht
8. Juli 1985	Protokoll zu dem Übereinkommen von 1979 über weiträumige, grenzüberschreitende Luftverunreinigung
16. September 1987	Montrealer Protokoll über Stoffe, die zu einem Abbau der Ozonschicht führen
28. September bis 2. Oktober 1987	Erste Arbeitstagung über „Entwicklung von Strategien als Reaktion auf Klimaänderungen“, Villach
9. bis 13. November 1987	Zweite Arbeitstagung über „Entwicklung von Strategien als Reaktion auf Klimaänderungen, Bellagio
27. bis 30. Juni 1988	Weltkonferenz über Veränderungen der Atmosphäre in Toronto
7. bis 10. November 1988	Welt-Kongreß „Klima und Entwicklung“ in Hamburg
20. bis 22. Februar 1989	Sachverständigentagung zum Schutz der Erdatmosphäre in Ottawa
Februar 1989	Konferenz über globale Erwärmung und Klimaänderungen in Neu Dehli
15. März 1989	Internationale Umweltschutzkonferenz in Den Haag
17. bis 22. September 1989	14. Kongreß der Weltenergiekonferenz in Montreal
6. bis 7. November 1989	Internationale Umweltkonferenz über atmosphärische Verschmutzung und Klimaveränderung in Noordwijk
16. Mai 1990	Nachfolge-Konferenz zum Bericht der Weltkommission über Umwelt und Entwicklung in Bergen
21. bis 31. Mai 1990	Saarbrücker Konferenz über Energie, Klima und Entwicklung
27. bis 29. Juni 1990	2. Vertragsstaatenkonferenz zum Montrealer Protokoll in London

### 1.1 1. Weltklimakonferenz in Genf und Welt-Klima-Programm (1979)

Die 1. Weltklimakonferenz, die vom 12. bis 23. Februar 1979 in Genf stattfand, stand unter der Schirmherrschaft der Weltorganisation für Meteorologie (World Meteorological Organization, WMO) in Zusammenarbeit mit anderen Internationalen Regierungsorganisationen im Verbund der Vereinten Nationen, insbesondere dem Umweltprogramm der Vereinten Nationen (United Nations Environment Programme, UNEP). Ihren Hintergrund bildeten zum einen die spürbaren Klima-Anomalien um 1972, wie die Dürren im Sahelgürtel Afrikas, in Indien und Brasilien, der Zusammenbruch der peruanischen Anchovis-Fischerei als Folge eines großen El Nino-Ereignisses (vgl. Abschnitt C, 1. Kap.), ungewöhnliche Kälte und große Schneemengen in der kanadischen Arktis. Ähnliche Klima-Anomalien (Dürre 1976 in Westeuropa und Kalifornien, Schneeverwehungen in Norddeutschland 1978) traten in den letzten Jahren vor der Konferenz vielerorts auf. Zum anderen aber zeigten mehrere Modell-Untersuchungen über die Auswirkungen eines erhöhten atmosphärischen Kohlendioxid-Gehaltes auf das Klima, daß bei weiterem Anstieg des CO<sub>2</sub>-Gehalts auf längere Sicht mit einer merkbaren weltweiten Klimaänderung gerechnet werden müßte (4). Diese Angaben wurden inzwischen durch viele neuere Untersuchungen bestätigt (5).

Die auf der Konferenz versammelten Fachleute (etwa 300 Teilnehmer) berichteten über ihre Erkenntnisse hinsichtlich der Klimaschwankungen und Klimaänderung und deren Folgen für die Weltbevölkerung. Auf der Grundlage ihrer Beratungen appellierte die Konferenz in einem einstimmig verabschiedeten Aufruf an die Nationen, daß es unter Berücksichtigung des großen Einflusses des Klimas auf die menschliche Gesellschaft und auf vielen Gebieten menschlicher Betätigung und menschlichen Strebens jetzt für die Nationen der Erde dringend geboten sei,

- vollen Nutzen aus den derzeitigen Kenntnissen des Menschen über das Klima zu ziehen,
- Schritte zu unternehmen, um diese Kenntnisse entscheidend zu verbessern und
- mögliche Änderungen des Klimas durch den Menschen, die für das Wohlergehen der Menschheit nachteilig sein könnten, vorherzusehen und zu verhindern.

Als weitere Empfehlung wurde die Einrichtung eines umfassenden Klimaforschungsprogramms für die nächsten beiden Jahrzehnte gefordert. Dieser Empfehlung wurde auf dem achten Weltkongreß der WMO im Mai desselben Jahres entsprochen. Geschaffen wurde das sogenannte Welt-Klima-Programm (World Climate Programme, WCP). Das Programm, an dem auch UNEP beteiligt ist, besteht aus vier Unterprogrammen:

- Untersuchung des Wirkungsmechanismus des Klimas, um die jeweiligen Rollen natürlicher und vom Menschen verursachter Einflüsse zu klären (World Climate Impact Studies Programme, WCIP);
- Verbesserung des Erwerbs und der Verfügbarkeit von Klimadaten (World Climate Data Programme, WCDDP);

- Anwendung der Kenntnisse über das Klima bei Planung, Entwicklung und Leitung (World Climate Applications Programme, WCAP);
- Erstellung von Studien über die Auswirkungen von Klimaschwankungen und -änderungen auf menschliche Betätigung und die Übertragung der Ergebnisse solcher Studien in eine Form, die größtmöglichen Nutzen für Regierung und Bevölkerung verspricht (World Climate Research Programme, WCRP). Im einzelnen geht es darum, die Beziehungen zwischen Klima und menschlicher Gesellschaft besser zu erfassen. Hierzu gehört die Untersuchung
  - des möglichen Spielraumes gesellschaftlicher Anpassungen an Klimaschwankungen und -änderungen;
  - der besonderen Kennzeichen menschlicher Gesellschaft verschiedener Entwicklungsstufen und unterschiedlicher Umwelt, die sie besonders verletzlich oder elastisch gegenüber Klimaschwankungen und -änderungen machen;
  - der Mittel, durch die sich die menschliche Gesellschaft gegen nachteilige Folgen von Klimaschwankungen und -änderungen schützen oder aus den eventuell davon ausgehenden günstigen Möglichkeiten Vorteile ziehen kann (6).

### 1.2 Erste Klimakonferenz von Villach (1985)

Während einer unter anderem vom Umweltprogramm der Vereinten Nationen (United Nations Environment Programme, UNEP) im Jahr 1985 organisierten Konferenz in Villach erreichten Wissenschaftler aus 29 Industrie- und Entwicklungsländern einen Konsens über die möglichen Auswirkungen einer Klimaänderung. Dieser Konsens fand seinen Niederschlag im Welt-Klima-Programm, in dem 1986 betont wurde, daß in der ersten Hälfte des nächsten Jahrhunderts die globale Mitteltemperatur in einem Maße anwachsen könne, das größer sei als je zuvor in der Geschichte der Menschheit.

Auf der Basis dieser Übereinstimmung war es auch möglich, maßnahmenorientierte Gesichtspunkte in die Abschlusserklärung der Konferenz von Villach 1985 einzubringen. Die Konferenzteilnehmer betonten, daß viele wichtige ökonomische und soziale Entscheidungen mit langfristigen Konsequenzen unter der Annahme getroffen würden, daß Klimadaten der Vergangenheit einen zuverlässigen Hinweis auf die Zukunft geben könnten. Dieses sei aber nicht länger eine gerechtfertigte Annahme, da die zunehmenden Konzentrationen der Treibhausgase in der Atmosphäre diese signifikant im nächsten Jahrhundert erwärmen könnten.

Die Konferenz von Villach erzielte auch Einvernehmen über die Tatsache, daß eine Erwärmung, wie sie aus der Verdopplung des CO<sub>2</sub> resultieren könnte, tiefgreifende Auswirkungen auf das globale Ökosystem, die Landwirtschaft, den Wasserhaushalt und den Meeresspiegel haben könnte.

Zum erstenmal wurde in einer Abschlusserklärung einer internationalen Konferenz betont, daß die Rolle der anderen Treibhausgase genauso wichtig sei wie die des Kohlendioxids (7).

### 1.3 Arbeitstagungen von Villach und Bellagio (1987)

Das Jahr 1987 markiert den Übergang zwischen der Phase einer wissenschaftlichen Bestandsaufnahme und dem Beginn einer Diskussion über politische Maßnahmen zur Eindämmung des zusätzlichen Treibhauseffektes.

Die Diskussionen der ersten Villach-Konferenz wurden auf den Arbeitstagungen von Villach (28. September bis 2. Oktober 1987) und Bellagio (9. bis 13. November 1987) fortgeführt. Schwerpunkt der Tagungen war es, Strategien für mögliche Reaktionen auf Klimaveränderungen zu erarbeiten.

Die Teilnehmer der Bellagio-Tagung empfahlen sofortige Schritte

- zur Eindämmung der Zunahme von Treibhausgasen in der Atmosphäre (Ozon-Protokoll, energiepolitische Maßnahmen, forstpolitische Maßnahmen, Maßnahmen zur Reduktion anderer Spurengase);
- zur Eindämmung der Folgen des Meeresspiegelanstiegs (Strategien für die Fluß-, Flußmündungs- und Küstengebiete);
- zu einem besseren Verständnis des zusätzlichen Treibhauseffektes und Möglichkeiten zu seiner Bekämpfung.

Die Konferenz sprach sich dafür aus, die Notwendigkeit einer internationalen Vereinbarung über die Atmosphäre als globales Gut oder die Notwendigkeit einer dem Wiener Übereinkommen zum Schutz der Ozonschicht ähnlichen Vereinbarung von der WMO und von UNEP prüfen zu lassen (8).

### 1.4 Bericht der Weltkommission für Umwelt und Entwicklung (Brundtland-Bericht, 1987)

Die Weltkommission für Umwelt und Entwicklung (World Commission on Environment and Development, WCED) wurde auf der Basis einer Resolution der UN-Vollversammlung 1983 als unabhängiges Gremium eingesetzt, das Vorschläge und Empfehlungen zu kritischen Umwelt- und Entwicklungsproblemen erarbeiten sollte, um eine dauerhafte Entwicklung zu fördern.

Ihr Bericht, der sich in Teil II, Nr. 7 II unter der Überschrift „Fossile Brennstoffe. Das anhaltende Dilemma“ auch mit dem zusätzlichen Treibhauseffekt befaßt, wurde der UN-Vollversammlung auf ihrer 42. Tagung im Herbst 1987 vorgelegt.

Im Bericht wird die unverzügliche Aufnahme von Verhandlungen für ein internationales Übereinkommen über Strategien zur Bewältigung des zusätzlichen Treibhauseffektes gefordert, da offensichtlich kein

Staat das politische Mandat und die Wirtschaftskraft habe, den zusätzlichen Treibhauseffekt im Alleingang zu bekämpfen. Folgende Punkte müßten dabei beachtet werden:

- verbesserte Überwachung und Abschätzung der auftretenden Phänomene;
- intensivere Forschung zur Verbesserung der Kenntnisse über Ursprünge, Mechanismen und Auswirkungen der Phänomene;
- Entwicklung international abgestimmter Politiken zur Verringerung der Treibhausgase und
- Einführung der erforderlichen Strategien, um die Schäden so gering wie möglich zu halten und die Probleme der Klimaänderungen und des ansteigenden Meeresspiegels zu bewältigen.

In dem Bericht wird ferner angeregt, derartige Verhandlungen auf ein internationales Übereinkommen über politische Strategien zur Kontrolle sämtlicher umweltrelevanter Chemikalien, die in der Atmosphäre freigesetzt werden, auszurichten (9). Hinsichtlich institutioneller Erfordernisse sprach sich die Weltkommission insbesondere für eine Aufwertung des Umweltprogramms der Vereinten Nationen (UNEP) aus. Die erleichternde und koordinierende Rolle des UNEP innerhalb der Vereinten Nationen könne und solle verstärkt und ausgedehnt werden. Es sei notwendig, die Arbeit des UNEP durch die Mitarbeit hochrangiger Vertreter der Mitgliedsstaaten, die Verbesserung der Finanzlage und die Bildung von Schwerpunkten im Umweltfonds zu effektivieren (10).

### 1.5 Wirtschaftsgipfel von Toronto (1988)

Der Wirtschaftsgipfel in Toronto vom 19. bis 21. Juni 1988 war ein erster Schritt hin zu internationalen Regierungsinitiativen zur Eindämmung des zusätzlichen Treibhauseffektes. Erstmals befaßte sich ein hochrangiges Gremium auf Regierungsebene mit der Klimaproblematik.

Die Teilnehmer des Gipfels betonten, daß die grenzüberschreitenden Umweltgefahren dringlich und vermehrt nach internationaler Zusammenarbeit verlangten. Weltweite Klimaänderungen und andere globale Umweltgefahren bedürften besonderer Aufmerksamkeit. Es sei daher an der Zeit, im Rahmen des Genfer Übereinkommens über weiträumige grenzüberschreitende Luftverunreinigung die Verhandlungen über ein Protokoll zu Stickoxidemissionen energisch voranzutreiben. Die Bemühungen des Umweltprogramms der Vereinten Nationen (UNEP) um eine Vereinbarung über die grenzüberschreitende Verbringung gefährlicher Abfälle seien ebenso zu unterstützen wie die Einrichtung eines mit weltweiten Klimaänderungen befaßten zwischenstaatlichen Gremiums unter der Schirmherrschaft des UNEP und der Weltorganisation für Meteorologie (WMO) (vgl hierzu Nr. 5.3: Intergouvernementaler Ausschuß über Klimaänderungen, IPCC). Begrüßt wurde in diesem Zusammenhang auch die kurz nach dem Gipfel stattfindende Klimakonferenz von Toronto (11).

### 1.6 Klimakonferenz von Toronto (1988)

Eine weitere Konkretisierung erfuhr die internationale Politik zum Schutz der Erdatmosphäre durch die von der kanadischen Regierung organisierte und als „follow up“ zum Brundtland-Bericht intendierte „World Conference on the Changing Atmosphere, Implications for Global Security“ in Toronto vom 27. bis zum 30. Juni 1988, an der 300 Wissenschaftler und Politiker aus 48 Ländern und Internationalen Regierungsorganisationen teilnahmen.

Die Schlußerklärung der Toronto-Konferenz enthielt unter anderem die folgenden Empfehlungen:

- Reduzierung der Emissionen von CO<sub>2</sub> und anderer Spurengase global um mehr als 50 Prozent bis zum Jahr 2050;
- Verringerung der CO<sub>2</sub>-Emissionen global um etwa 20 Prozent der Emissionen von 1988 bis zum Jahr 2005;
- Steigerung des Energiewirkungsgrades um 10 Prozent bis zum Jahr 2005;
- Kennzeichnungspflicht für Produkte, die die Atmosphäre verunreinigen (12).

Weiterhin empfahl die Konferenz die Ausarbeitung einer umfassenden Rahmenvereinbarung zum Schutz der Erdatmosphäre. Dieser Rahmenvereinbarung seien verschiedene Protokolle anzuhängen, die bestimmte Sachgebiete einer Klimapolitik zum Gegenstand hätten. Die Ausarbeitung eines Konventionsentwurfs wurde nachfolgenden internationalen Konferenzen und Arbeitstagungen überlassen (vgl. zur Einschätzung der Toronto-Empfehlungen durch die Enquete-Kommission: Abschnitt F, 2. Kapitel, Nr. 4.1.1).

### 1.7 Sachverständigentagung in Ottawa (1989)

Erstmals befaßte sich die wiederum von der kanadischen Regierung veranstalteten Sachverständigentagung „Protection of the Atmosphere: International Meeting of Legal and Policy Experts“ in Ottawa vom 20. bis zum 22. Februar 1989 mit dieser Frage. Diese Veranstaltung legte zum Teil noch heute bestehende Meinungsverschiedenheiten über die Ausgestaltung eines internationalen Vertragswerkes zum Schutz der Erdatmosphäre offen.

Während Kanada eine Rahmenvereinbarung vorschlug, die neben den klimarelevanten Treibhausgasen auch andere Beeinträchtigungen der Erdatmosphäre umfassen sollte, hielten die Vereinigten Staaten eine Klimakonvention im engeren Sinne für ratsam, die nur die Treibhausgase und den Schutz der Wälder enthalten sollte (13). Der Exekutivdirektor des UNEP sprach sich auf der Konferenz für die letztgenannte Variante aus, da eine umfassende Atmosphären-Konvention die Politik überfordere. Ohne zwischen diesen beiden Vorgehensweisen eine Entscheidung herbeizuführen, wurde in die Schlußerklärung des Ottawa-Treffens ein Teil A zu der weiter gefaßten Atmosphären-Konvention (Kanada-Vorschlag) und ein Teil B zu der enger zu interpretierenden Klima-

Konvention (USA-Vorschlag) aufgenommen. Teil A enthält folgende Vorschläge für den Regelungsinhalt einer Konvention:

- Definition der Begriffe (Beispiel: Erdatmosphäre);
- Feststellung, daß die Atmosphäre ein gemeinsames Gut von lebenswichtiger Bedeutung (common resource of vital interest) ist;
- Schutz- und Erhaltungspflichten der Staaten für die Atmosphäre;
- Kooperationspflichten der Staaten;
- Informationsaustausch und gegebenenfalls Technologietransfer zwischen den Staaten;
- Überwachungsprogramm.

In Teil B wurden die folgenden Punkte angesprochen:

- Vereinbarungen von Protokollen zu folgenden Bereichen: Substanzen, die auf die Erdatmosphäre einwirken (CO<sub>2</sub>, Methan, u. a.); Rodungen der Wälder und Wiederaufforstung; Gründung eines Welt-Klimafonds;
- Kontrollen, die die Einhaltung der entsprechenden Protokolle überwachen, (14).

### 1.8 Internationale Umweltschutzkonferenz in Den Haag (1989)

Die bisherigen internationalen Bemühungen um die Eindämmung des zusätzlichen Treibhauseffekts fanden eine Fortsetzung in der von Frankreich, den Niederlanden und Norwegen gemeinsam veranstalteten „Internationalen Umweltschutzkonferenz“ in Den Haag am 11. März 1989.

Die Teilnehmer vertraten in der Schlußerklärung der Konferenz die Überzeugung, daß die Welt sich angesichts eines Problems, dessen Lösung die drei Hauptelemente Lebenserhaltung, Dringlichkeit und Globalität umfasse, in einer Situation befinde, die nicht nur nach der Anwendung bestehender Grundsätze, sondern auch nach einer neuen Strategie verlange. Neue völkerrechtliche Grundsätze einschließlich neuer, wirksamerer Entscheidungs- und Durchsetzungsmechanismen seien zu entwickeln. Erforderlich seien weiterhin ordnende und flankierende Maßnahmen sowie Anpassungsmaßnahmen, die der Beteiligung und dem möglichen Beitrag von Ländern mit unterschiedlichem Entwicklungsstand Rechnung trügen. Der größte Teil der Emissionen, die gegenwärtig die Atmosphäre schädigten, entstehe in den Industriestaaten. Gerade diese Staaten seien es auch, die über die meisten Mittel zu einer wirksamen Bewältigung dieses Problems verfügten.

Neben den Grundsätzen zum Technologietransfer und zum Lastenausgleich zugunsten der Entwicklungsländer formulierten die Unterzeichnerstaaten den Grundsatz, im Rahmen der Vereinten Nationen neue institutionelle Befugnisstrukturen zu schaffen. Entweder seien bestehende Institutionen zu stärken, oder es sei eine neue Institution einzurichten, die im



Zusammenhang mit dem Schutz der Erdatmosphäre für die Bekämpfung einer weiteren weltweiten Erwärmung der Atmosphäre zuständig sei und in der Entscheidungsverfahren zur Anwendung kommen sollten, die auch dann wirksam seien, wenn in bestimmten Fällen kein Einvernehmen erzielt werden könne (vgl. hierzu Abschnitt G, 1. Kapitel, Nr 2: Schaffung eines Umweltrates).

Ausgehend von diesen Grundsätzen betonten die Unterzeichnerstaaten der Erklärung von Den Haag ihre Entschlossenheit,

- alle Staaten der Welt und die für diesen Bereich zuständigen Internationalen Organisationen aufzufordern, sich unter Berücksichtigung der Untersuchungen des IPCC an der Entwicklung der Rahmenverträge und anderer rechtlicher Übereinkünfte zu beteiligen, die zur Schaffung der institutionellen Befugnisstruktur und zur Anwendung der übrigen obengenannten Grundsätze zum Schutz der Atmosphäre und zur Bekämpfung der Klimaveränderungen, vor allem der Erwärmung der Erdatmosphäre, notwendig seien;
- alle Staaten der Welt und die für diesen Bereich zuständigen internationalen Organisationen nachdrücklich aufzufordern, Übereinkommen zum Schutz der Natur und der Umwelt zu unterzeichnen und zu ratifizieren;
- alle Staaten der Welt aufzurufen, diese Erklärung zu unterstützen.

Diese und andere Aussagen der Erklärung (15) sind innovativer und weitreichender, als dies in der Regel bei vergleichbaren Anlässen der Fall war und ist. Dies erklärt sich zum Teil dadurch, daß wichtige Verursacher von CO<sub>2</sub>-Emissionen, wie etwa die USA, Großbritannien und die Sowjetunion, nicht an der Konferenz teilnahmen.

### 1.9 Wirtschaftsgipfel in Paris (1989)

Breiten Raum nahmen globale Umweltschutzprobleme auch auf dem Wirtschaftsgipfel in Paris vom 14. bis zum 16. Juli 1989 ein. In der Wirtschaftserklärung der Teilnehmer des Gipfels wurde betont, daß einschneidende Maßnahmen dringend erforderlich seien, um das ökologische Gleichgewicht verstehen und schützen zu können (16).

Neben der Befürwortung von Technologietransfer und finanziellen Hilfen für die Entwicklungsländer sprachen sich die Teilnehmer des Gipfels entschieden für gemeinsame Bemühungen zur Begrenzung der Emissionen von Kohlendioxid und anderen den zusätzlichen Treibhauseffekt hervorrufenden Gasen aus, die zu Klimaveränderungen zu führen drohten, die die Umwelt und letztlich auch die Wirtschaft gefährdeten. Ausdrücklich unterstützt wurde die diesbezügliche Arbeit des IPCC und der WMO.

Zu institutionellen Fragen wurde erklärt, daß die zunehmende Komplexität der mit dem Schutz der Atmosphäre zusammenhängenden Fragen innovative Lösungen erforderlich mache. Neue Übereinkünfte seien in Betracht zu ziehen. Der Abschluß einer Rah-

menübereinkunft über Klimaveränderungen, in der allgemeine Grundsätze oder Leitlinien festgelegt würden, sei dringend erforderlich (17).

Die Teilnehmer des Gipfels traten weiterhin dafür ein, daß bereits vorhandene wirksame Umweltinstitutionen im System der Vereinten Nationen gestärkt werden sollten. Dies gelte insbesondere für UNEP, das finanziell besser unterstützt werden müsse. Einige der Regierungen waren sich darin einig, daß die Schaffung einer neuen Institution innerhalb der Vereinten Nationen ebenfalls in Betracht kommen könne (18).

### 1.10 Konferenz über globale Erwärmung und Klimaänderungen in Neu Delhi (1989)

Konkrete Formulierungen zum zusätzlichen Treibhauseffekt enthält auch die Schlußerklärung der „Conference on GLOBAL WARMING AND CLIMATE CHANGE“ im Februar 1989 in Neu Delhi, die vom renommierten Tata Energy Research Institute (TERI) ausgerichtet und von UNEP und dem World Resources Institute (WRI) mitfinanziert wurde.

Ziel der Konferenz war es insbesondere, die spezifischen Interessen der Entwicklungsländer im Zusammenhang mit dem zusätzlichen Treibhauseffekt zu artikulieren. Im Abschlußdokument der Konferenz wird erklärt, die Teilnehmer der Konferenz seien der Auffassung, daß zunächst die Industrieländer als primär Verantwortliche für die sich erhöhende Konzentration von Kohlendioxid und anderen Spurengasen in der Erdatmosphäre sofort Maßnahmen einzuleiten hätten, um die Konzentrationen dieser Spurengase abzusenken. Hierzu zählten

- Maßnahmen zur Energieeinsparung durch eine Erhöhung der Effizienz in der Verwendung fossiler Energieträger,
- die prioritäre Einführung nicht fossiler Energietechnologien und
- zur Finanzierung dieser Maßnahmen auch auf globaler Ebene die Einführung von Steuern/Abgaben auf Emissionen. Da sie die notwendigen Ressourcen besäßen, komme den Industrieländern eine besondere Verantwortung dabei zu, die Entwicklungsländer bei der Suche und Finanzierung geeigneter Gegenmaßnahmen zu unterstützen.

Aufgabe der Entwicklungsländer sei es unter anderem

- auf allen staatlichen Ebenen Bewußtseinsbildung in bezug auf die Folgen und die Natur des zusätzlichen Treibhauseffekts zu leisten, und
- ihre Energiepolitik und ihr Ausgabenverhalten den Erfordernissen anzupassen (19).

### 1.11 14. Kongreß der Weltenergiekonferenz in Montreal (1989)

Der 14. Kongreß der Weltenergiekonferenz (World Energy Conference, WEC), der vom 17. bis 22. September 1989 in Montreal/Kanada stattfand und an dem rund 4800 Fachleute, Politiker und Beobachter

aus über 80 Ländern teilnahmen, hat gezeigt, daß sich die Schwerpunkte der Diskussion um die globale Energieversorgung von den ökonomischen und technischen auf die umwelt- und gesellschaftspolitischen Fragestellungen verlagert haben. Der Kongreß kam zu der Schlußfolgerung, daß eine Neuorientierung der Energie- und Umweltpolitik unumgänglich sei, wenn das als erforderlich angesehene weitere Wachstum des Energiebedarfs mit erträglichen Belastungen für die globale Umwelt- und Klimasituation vereinbar sein solle. Die während des Kongresses vorgestellte Prognose „Global Energy-Perspectives 2000–2020“ kam für den Prognosezeitraum von 1985 bis 2020 zu dem Ergebnis, daß bei moderater wirtschaftlicher Entwicklung mit einem Anstieg der energiebedingten klimarelevanten CO<sub>2</sub>-Emissionen um 70 Prozent (1,8 Prozent pro Jahr) und bei limitierter wirtschaftlicher Entwicklung um 45 Prozent (1,2 Prozent pro Jahr) zu rechnen sei. An der Existenz des zusätzlichen Treibhauseffektes und seinen weitreichenden Folgen bestanden keinerlei Zweifel. Die Warnungen der Klimatologen wurden aufgegriffen, die Gefahren des zusätzlichen Treibhauseffektes von keiner Seite ernsthaft in Frage gestellt. Konsens bestand darüber, daß vorsorgliches politisches Handeln schon jetzt unerlässlich sei. In seiner Eröffnungsansprache bekräftigte der kanadische Regierungschef Brian Mulroney seine Forderung vom Vorjahr, bis zur UN-Konferenz über Umwelt und Entwicklung im Jahre 1992 in Brasilien eine internationale CO<sub>2</sub>-Konvention unterschriftsreif vorzubereiten. Die Konvention solle völkerrechtlich nach dem Konzept des Internationalen Seerechts gestaltet werden.

In der Debatte über künftige Lösungswege zur Begrenzung des CO<sub>2</sub>-Ausstoßes war man sich grundsätzlich einig. In Frage kämen

- sparsamer und rationellerer Energieeinsatz, insbesondere bei den Prozessen, die fossile Brennstoffe einsetzen,
- verstärkte Nutzung CO<sub>2</sub>-freier Prozesse sowie
- Substitution CO<sub>2</sub>-intensiver durch CO<sub>2</sub>-schwacher Prozesse (20).

### **1.12 Internationale Umweltkonferenz über Atmosphären-Verschmutzung und Klimaveränderung in Noordwijk (1989)**

Die etwa acht Monate nach der Konferenz von Den Haag nach Noordwijk einberufene „Internationale Umweltkonferenz über Atmosphären-Verschmutzung und Klimaveränderung“ vom 6. bis zum 7. November 1989 zeichnete sich durch Auseinandersetzungen zwischen den Industrieländern über die anzuwendende CO<sub>2</sub>-Reduktionsstrategie aus.

Die Konferenz befaßte sich hauptsächlich mit der Stabilisierung und späteren Reduzierung von CO<sub>2</sub>-Emissionen, möglichen Maßnahmen zum Erhalt und zur späteren Ausdehnung des gesamten Waldbestandes der Erde, verschiedenen Möglichkeiten der Finanzierung klimapolitischer Maßnahmen, den Elementen einer Klimakonvention sowie den gemeinsamen und jeweils spezifischen Verantwortlichkeiten der Industrie- und Entwicklungsländer.

Zwar pflichteten die meisten Teilnehmer während der Beratungen der Notwendigkeit von finanzieller Unterstützung und Technologietransfer zugunsten der Entwicklungsländer bei, da diese Länder den notwendigen Reduktionspflichten aus eigener Kraft kaum nachkommen könnten. Keine Einigung konnte indes über das Vorgehen der Industrieländer erzielt werden. In dem von den Niederlanden vorgelegten Entschließungsentwurf waren die Industrieländer dazu aufgefordert worden, ihre CO<sub>2</sub>-Emissionen bis zur Jahrtausendwende zu stabilisieren und anschließend bis zum Jahr 2005 um 20 Prozent zurückzuführen. Vor allem die USA und Japan wiesen eine solche Erklärung aber zurück. Ähnlich verhielten sich die Sowjetunion und Großbritannien.

In der schließlich verabschiedeten Schlußerklärung erkennen die 69 teilnehmenden Staaten zwar die Notwendigkeit an, bei Aufrechterhaltung einer stabilen Entwicklung der Weltwirtschaft die Emissionen von CO<sub>2</sub> und anderen Treibhausgasen, die nicht im Protokoll von Montreal geregelt sind, zu stabilisieren. Ohne diese Notwendigkeit in eine konkrete Verhaltenszusage zu übertragen, erklären sie dann aber lediglich, daß diese Stabilisierung so bald wie möglich zu erfolgen habe. Das von den niederländischen Gastgebern vorgeschlagene und an die Empfehlungen der Klimakonferenz in Toronto anknüpfende Vorgehen fand in der verabschiedeten Schlußerklärung nur insofern seinen Niederschlag, als erwähnt wird, daß nach Ansicht vieler Industrieländer eine Stabilisierung von CO<sub>2</sub>-Emissionen als ein erster Schritt spätestens bis zum Jahr 2000 erreicht werden sollte.

Zur Frage völkerrechtlicher Übereinkommen wird angeregt, daß alle Länder UNEP und die WMO und damit auch IPCC bei der Ausarbeitung von Elementen einer Konvention über Klimaänderungen unterstützen sollten. Spätestens bis 1992 solle der Entwurf erarbeitet werden, damit er auf der UN-Konferenz über Umwelt und Entwicklung in Brasilien beraten werden könne (21).

### **1.13 Nachfolge-Konferenz zum Bericht der Weltkommission über Umwelt und Entwicklung in Bergen (1990)**

Von einer ähnlichen Auseinandersetzung wurde das Ministertreffen der „Konferenz über dauerhafte Entwicklung“ geprägt, die von der Wirtschaftskommission der Vereinten Nationen für Europa (UN Economic Commission for Europe, ECE) zusammen mit der norwegischen Regierung am 16. Mai 1990 in Bergen veranstaltet wurde. Es handelt sich um eine von bisher zwei Regionalkonferenzen, die die Vereinten Nationen im Hinblick auf die 1992 in Brasilien stattfindende UN-Konferenz über Umwelt und Entwicklung vorgesehen haben. Die andere Konferenz wurde von der Wirtschaftskommission der Vereinten Nationen für Afrika (UN Economic Commission for Africa), im Juni 1989 in Kampala veranstaltet. Weitere Treffen sind geplant in Bangkok (10. bis 16. Oktober 1990), in Mittel- oder Lateinamerika (Ende 1990 oder Anfang 1991), im Nahen Osten (zweites Quartal 1991) und noch einmal in Afrika (Termin unsicher).

Wiederum konnten sich die teilnehmenden Delegationen nach heftigen Diskussionen nur auf die relativ unverbindliche Forderung einigen, die Emissionen von CO<sub>2</sub> und anderen Treibhausgasen seien sobald wie möglich zu stabilisieren (22).

Diskussionen riefen auch die Frage der Unterstützung der Entwicklungsländer und der osteuropäischen Länder sowie die Aufnahme des „Vorsorgeprinzips“ in den Text der Schlußerklärung hervor. Letzteres wurde insbesondere von den USA und Großbritannien zunächst in Frage gestellt. Später wurden diese Punkte aber neben den Vorstellungen dieser Länder in das Schlußdokument aufgenommen.

Die Unterzeichner dieser Erklärung drückten ihre volle Unterstützung für ein internationales Rahmenübereinkommen zur Eindämmung des zusätzlichen Treibhauseffektes sowie auch für Ausführungsprotokolle zu den Themen „Treibhausgase“ und „Wälder“ aus. Rahmenabkommen und Protokolle sollten nicht später als bis 1992 zur zweiten UN-Konferenz für Umwelt und Entwicklung in Brasilien unterzeichnet werden.

#### **1.14 Saarbrücker Konferenz über Energie, Klima und Entwicklung (1990)**

Eine weitere energiepolitische Tagung der letzten Jahre fand vom 21. bis 31. Mai 1990 in Saarbrücken statt. Die Tagung wurde organisiert vom Wissenschaftszentrum der Vereinten Nationen (United Nations Centre for Science and Technology for Development, UNCSTD) und dem Institut für Umweltschutz (INFU) der Universität Dortmund. Im Zentrum der von etwa 160 Teilnehmern aus über 40 Staaten besuchten Veranstaltung standen Fragen einer integrierten Energie- und Klimapolitik.

Die Notwendigkeit der gemeinsamen Verantwortung und Zusammenarbeit bei der Auseinandersetzung mit drohenden Klimaänderungen wurde von allen Teilnehmern aus Ost und West sowie aus Nord und Süd gleichermaßen anerkannt. Die Situation und die Möglichkeiten der Entwicklungsländer, auf die Klimaänderungen ohne Verzicht auf eigenes wirtschaftliches Wachstum reagieren zu können, wurden realistisch gewürdigt, ohne die Entwicklungsländer aus der eigenen Verantwortung zu entlassen. Wichtig war in diesem Zusammenhang, daß die Volksrepublik China angeboten hat, mit Unterstützung der Vereinten Nationen eine ähnlich gelagerte Konferenz im Jahre 1991 auszurichten. In der Schlußerklärung der Saarbrücker Konferenz (Highlights of Deliberations) wird erstmals in einer Konferenz unter der Ägide der Vereinten Nationen die Forderung nach Vor- und Mehrleistungen der Industrieländer beim Abbau von CO<sub>2</sub>-Emissionen konzipiert und in Verbindung mit einer internationalen Konvention gebracht. Ausgegangen wurde von der Annahme der Toronto-Konferenz des Jahres 1988, die ein Reduktionsziel von weltweit 20 Prozent der CO<sub>2</sub>-Emissionen bis zum Jahr 2005 vorschlug. Nach Auffassung der Teilnehmer der Saarbrücker Konferenz bedeutet dies, daß die Industrienationen mindestens 30 Prozent ihrer CO<sub>2</sub>-Emissionen reduzieren müssen, um einen Zuwachs des Energieverbrauchs in den Entwicklungsländern zuzulassen.

Auch die Emission anderer Spurengase wie Methan solle in eine internationale Konvention aufgenommen und geregelt werden, die bis spätestens 1992 ausgehandelt werden soll. Die Teilnehmer der Konferenz waren sich darin einig, daß der Abbau von CO<sub>2</sub>-Emissionen um 30 Prozent bis zum Jahr 2005 in einem Industrieland wie der Bundesrepublik Deutschland ohne Einbuße an wirtschaftlichem Wachstum erreicht werden kann, und zwar im wesentlichen durch Energieeinsparung und Energieeffizienzsteigerung durch die verstärkte Nutzung regenerativer Energiequellen (23).

#### **1.15 Wirtschaftsgipfel in Houston (1990)**

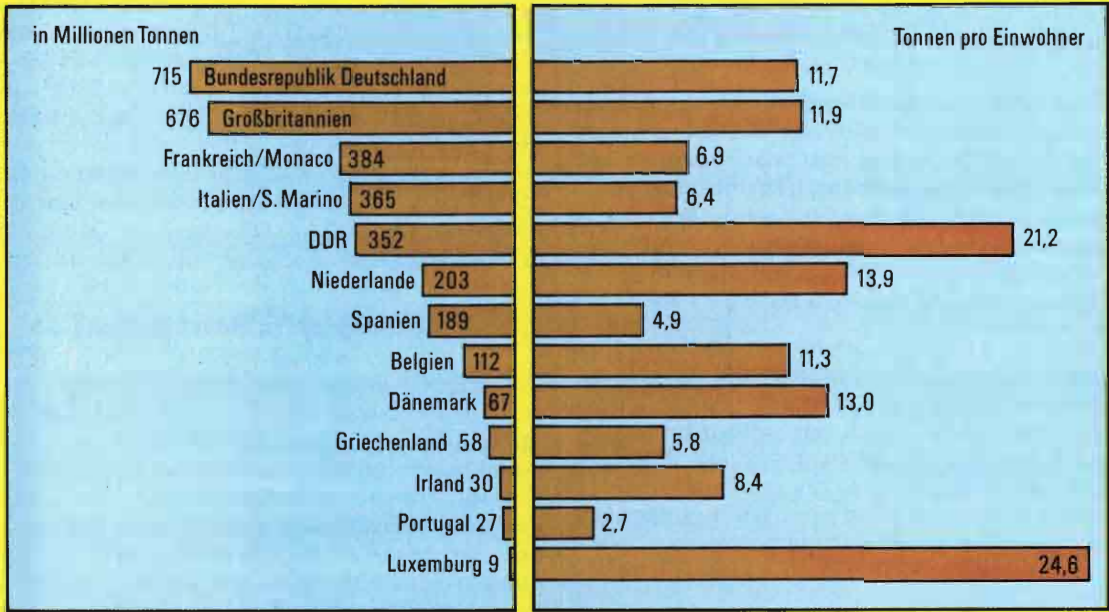
In Fortführung ihrer Bemühungen um eine Strategie zur Verringerung der Emissionen klimarelevanter Spurengase durch den Energiesektor haben sich die Teilnehmer des Wirtschaftsgipfels in Houston darum bemüht, ein gemeinsames Vorgehen festzulegen. In der Wirtschaftserklärung des Gipfels heißt es hierzu, daß man dazu verpflichtet sei, gemeinsame Anstrengungen zur Begrenzung der Emissionen von Treibhausgasen, wie beispielsweise Kohlendioxid, zu unternehmen. Einig war man sich auch darin, daß die Aushandlung eines Rahmenübereinkommens über die Klimaveränderungen unter der Ägide des Umweltprogramms der Vereinten Nationen und der Weltorganisation für Meteorologie (WMO) bis 1992 – also bis zur UN-Konferenz über Umwelt und Entwicklung in Brasilien – fertiggestellt sein soll. Geeignete Durchführungsprotokolle sollten so rasch wie möglich ausgearbeitet werden und sich mit allen Fragen von der Entstehung bis zur Entsorgung befassen (24).

Konkrete Reduktionspflichten oder Vorschläge zu diesem Punkt wurden nicht benannt. Vertreter der Bundesregierung wiesen auf einer Pressekonferenz zu den Ergebnissen des Gipfels darauf hin, daß es zu dieser Frage unterschiedliche Diskussionsentwicklungen in den einzelnen Ländern gebe, die respektiert werden müßten. In der Analyse der Umweltprobleme, insbesondere der drohenden Klimaveränderungen, gebe es keine wesentlichen Meinungsunterschiede. Solche Unterschiede bestünden bei der Einschätzung des wünschenswerten Tempos und der Art, wie das Problem rechtlich verbindlich gelöst werden solle. Dementsprechend vermeidet die Wirtschaftserklärung des Gipfels hier eine Festlegung und verweist auf die Arbeit des Intergouvernementalen Ausschusses über Klimaänderungen (IPCC) und die bevorstehende zweite Weltklimakonferenz in Genf, die allen Ländern Gelegenheit biete, die Verabschiedung von Strategien und Maßnahmen zur Begrenzung oder Stabilisierung der klimarelevanten Spurengasemissionen aus dem Energiesektor zu prüfen und wirksame internationale Reaktionen zu diskutieren.

## **2. Maßnahmen der EG**

Die EG emittierte im Jahre 1986 14,1 Prozent der weltweiten CO<sub>2</sub>-Emissionen aus dem Energiebereich (vgl. zum Beitrag der einzelnen EG-Mitgliedstaaten, Abb. 2). Sie steht damit nach den USA noch vor der UdSSR, der Volksrepublik China und Japan, an zwei-

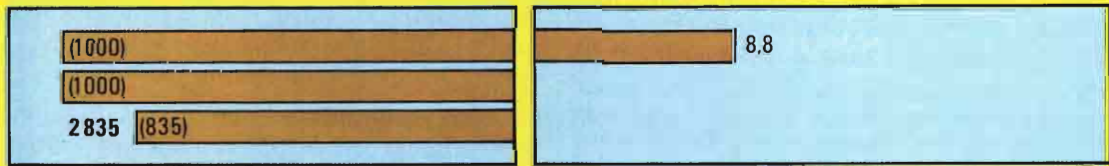
### CO<sub>2</sub>-Emission in der EG



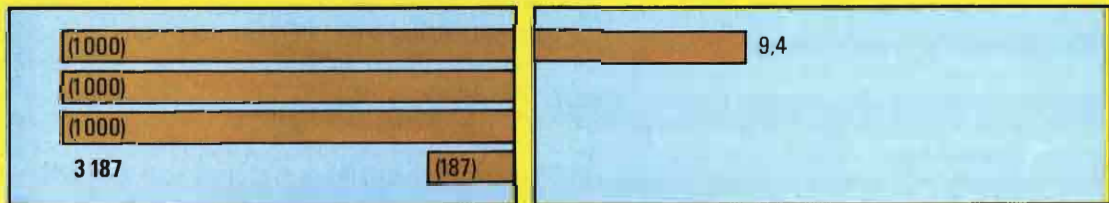
#### Bundesrepublik Deutschland (einschließlich der ehemaligen DDR)



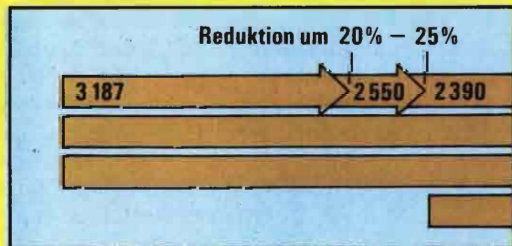
#### EG (ohne ehemalige DDR)



#### EG (einschließlich der ehemaligen DDR)



#### EG (einschließlich der ehemaligen DDR)



Reduktionsplan der  
Enquete-Kommission  
bis zum Jahr 2005

Abb. 2: Energiebedingte CO<sub>2</sub>-Emissionen der EG-Mitgliedstaaten im Jahr 1986 (25).

ter Stelle der CO<sub>2</sub>-Emittenten. Demzufolge ist die EG ein wichtiger Faktor einer internationalen Politik zur Eindämmung des zusätzlichen Treibhauseffektes. Nachfolgend werden wichtige Aktivitäten der EG und ihrer Mitgliedstaaten dargestellt, die ebenfalls für die Konzeption einer internationalen Strategie zur Reduktion energiebedingter klimarelevanter Spurengasemissionen von Bedeutung sind. Aus diesen Aktivitäten kann auch abgeleitet werden, wie die Zuständigkeiten für die zu schaffenden Übereinkommen zwischen der EG und ihren Mitgliedstaaten verteilt sind.

## 2.1 Europäischer Rat, EG-Kommission und andere Organe

Bereits 1978 schlug die EG-Kommission ein fünfjähriges Forschungsprogramm auf dem Gebiet der Klimatologie vor, das im Dezember 1979 vom Ministerrat verabschiedet wurde.

Hauptziel des EG-Klimaprogramms war die Vorhersage des Klimas, um gezielt Maßnahmen gegen die Auswirkungen von Klimaänderungen treffen zu können. Die Prioritätenliste des Forschungsprogramms umfaßte

- das Verständnis klimatischer Vorgänge (Rekonstruktion vergangener Klimazustände, Erstellung von Klimamodellen und Vorhersage) und
- die Interaktionen Mensch – Klima (Klimaveränderungen und Ressourcen, Beeinflussung des Klimas durch den Menschen).

Zur Unterstützung dieser Forschungsprogramme wurden noch folgende Sonderaktivitäten beschlossen:

- Schaffung einer fachübergreifenden Arbeitsgruppe zur Untersuchung klimatischer Auswirkungen;
- Bestandsaufnahme, Koordinierung und Ausbau europäischer Bestände von Klimadaten.

Im September 1986 verabschiedete dann das Europäische Parlament eine Entschließung, die die absolute Notwendigkeit von Gegenmaßnahmen unterstreicht, die über die gegenwärtig lediglich aus Reinhaltungsgründen getroffenen Maßnahmen hinausgehen und sich gegen die Emission sowohl von Kohlendioxid als auch den anderen Treibhausgasen richten, die im Gegensatz zu früheren Annahmen in ebenso großem Maße wie Kohlendioxid zur Erwärmung beitragen. Weiterhin forderte das Europäische Parlament die Kommission auf, bei künftigen agrar-, industrie- und energiepolitischen Vorhaben und bei den Verhandlungen mit internationalen und nationalen Stellen das Augenmerk auf Maßnahmen zu richten, die zu einer wesentlichen Reduzierung der Schadstoffemissionen führen könnten, was sich im übrigen auch positiv auf die Umwelt auswirken werde.

Im November 1986 organisierte die Generaldirektion XII (Forschung und Technologie) der EG ein Symposium zum Thema „CO<sub>2</sub> und andere Treibhausgase: klimatische und andere Auswirkungen“.

Im Abschlußdokument sprachen sich die versammelten Wissenschaftler neben rein wissenschaftlichen

Schlußfolgerungen auch für einen besseren und direkteren Dialog zwischen Wissenschaftlern und Entscheidungsträgern aus (26).

Das vierte Aktionsprogramm für den Umweltschutz der EG vom 19.10.1987 hingegen erwähnt den zusätzlichen Treibhauseffekt und die daraus erwachsenden Notwendigkeiten politischen Handelns auf internationaler Ebene nur am Rande (27).

Konsequenter Schritte zur Vermeidung des zusätzlichen Treibhauseffektes wurden in der EG aber erst ab 1988 eingeleitet. In einer Mitteilung an den Rat vom 16. November 1988 mit dem Titel „Der Treibhauseffekt und die Gemeinschaft“ beschäftigt sich die EG-Kommission mit der Klimaforschung, mit möglichen Maßnahmen zur Eindämmung und auch zur Anpassung an den zusätzlichen Treibhauseffekt. In den Schlußfolgerungen befürwortet sie eine Eliminierung der FCKW bis zum Jahr 2000, ein internationales Abkommen zum Schutz der Erdatmosphäre und im Rahmen einer notwendigen Antwortstrategie eine Zusammenarbeit mit Internationalen Regierungsorganisationen wie WMO, UNEP, OECD, IEA und eine Unterstützung der Entwicklungsländer (28). Die Kommission regte außerdem ein umfangreiches Arbeitsprogramm zu möglichen Gegenmaßnahmen sowie zu Forschung und Entwicklung auf dem Gebiet der Energieeinsparung und anderem an.

Dieses Arbeitsprogramm ist jedoch mit Ausnahme der Maßnahmen, die die Produktion und den Verbrauch von FCKW betreffen, in nur unzureichendem Maße handlungsorientiert und steht hinter den Empfehlungen der Klima-Konferenz „The Changing Atmosphere“ in Toronto im Juni 1988 zurück.

Gleichfalls im November 1988 legte die EG-Kommission das Umwelt-Forschungsprogramm EPOCH (Europäisches Programm für Klimatologie und natürliche Risiken) vor, das für verschiedene Bereiche der Klimaforschung in 5 Jahren 50 Millionen ECU aufwenden soll. Die finanzielle Ausstattung ist als unzureichend kritisiert und eine Aufstockung vorgeschlagen worden (29).

Auf der Grundlage dieser Mitteilung der EG-Kommission verabschiedete der Ministerrat der EG am 21. Juni 1989 eine Entschließung zum Thema „Treibhauseffekt und Gemeinschaft“, in der unter anderem erklärt wird, daß

- ein internationales Übereinkommen über die Klimaveränderungen notwendig sei;
- bis zur Jahrhundertwende der Verbrauch der Stoffe, die im Protokoll von Montreal geregelt sind, eingestellt werden sollte;
- auch in bezug auf andere für den zusätzlichen Treibhauseffekt bedeutsame Stoffe Maßnahmen erforderlich seien;
- die Wiederaufforstung intensiviert werden müsse;
- die Zerstörung der Tropenwälder und der Prozeß der Wüstenbildung beendet werden müßten;
- die EG-Kommission und die Mitgliedstaaten dringend ersucht werden müßten, Maßnahmen im

Sinne einer verstärkten Energieeinsparung, einer Erhöhung des Energiewirkungsgrades und der Entwicklung und Nutzung anderer Energiequellen als fossiler Brennstoffe zu ergreifen;

- die Anstrengungen und Unternehmungen zur Erforschung des zusätzlichen Treibhauseffekts intensiviert werden sollten;
- die Initiative der EG-Kommission, ein umfangreiches Programm zur Untersuchung politischer Optionen einzuleiten, begrüßt werde;
- die Öffentlichkeit ausführlich über den zusätzlichen Treibhauseffekt und die für seine Bekämpfung erforderlichen Maßnahmen unterrichtet werden solle;
- die EG-Kommission spätestens Ende 1990 einen Bericht mit konkreten Maßnahmenvorschlägen vorlegen solle.

Die Entschließung des Rates der EG umfaßt keine konkreten politischen Maßnahmen. Dem Antrag, die Emissionen von CO<sub>2</sub> auf dem derzeitigen Niveau zu stabilisieren, blieb die erforderliche Mehrheit versagt. Trotz allem wird diese Empfehlung des Rates als eine wichtige Initiative gewertet, da sie, an die Erklärung von Den Haag anknüpfend, die Aufnahme dieses Problemkomplexes in die Schlußerklärung des Wirtschaftsgipfels von Paris im Juli 1989 begünstigte (30).

Von Bedeutung ist weiterhin die Mitteilung der Kommission der Europäischen Gemeinschaft an den Rat vom November 1989 („Energie und Umwelt“). In dieser bezeichnet die EG-Kommission die effiziente Energienutzung und die Energieeinsparung als Eckpfeiler bei der Integration der Umweltbelange in die Energiepolitik, bei dem der Nachfrageseite größere Aufmerksamkeit zukomme als der Angebotsseite. Deshalb solle 1990 ein spezifisches Aktionsprogramm über effizientere Energienutzung (SAVE) vorgestellt werden, in dem unter anderem die Möglichkeiten eines „Least cost planning“ für die EG diskutiert werde. Mittelfristig sollten die Energiepreise alle sozialen Folgekosten widerspiegeln (31).

Während seiner Tagung am 25. und 26. Juni 1990 in Dublin verabschiedete der Europäische Rat dann eine Erklärung zur „Notwendigkeit des Schutzes der Umwelt“. Diese Erklärung, die Leitlinien für das künftige Vorgehen der EG darlegen will, nimmt unter anderem zur Zerstörung der Ozonschicht, zur anhaltenden und raschen Zerstörung der Tropenwälder und zum zusätzlichen Treibhauseffekt Stellung.

Aus jüngsten wissenschaftlichen Untersuchungen gehe hervor, daß die von den Menschen produzierten Emissionen die Konzentration von Gasen mit Treibhauseffekt in der Luft erheblich vergrößerten und daß ein gleichgültiges Verhalten in den nächsten Jahrzehnten zu einer weiteren Erwärmung der Erdatmosphäre führen werde. Der Rat fordert daher alle Länder auf, umfassende Maßnahmen zur effizienten Energienutzung und Energieeinsparung zu ergreifen und so bald wie möglich Zielvorgaben und Strategien für eine Beschränkung der Emission von für den Treibhauseffekt verantwortlichen Gasen festzulegen. Er ersucht die EG-Kommission um rasche Vorlage ih-

rer Vorschläge für konkrete Maßnahmen, insbesondere für Maßnahmen hinsichtlich der Kohlendioxidemissionen, damit die Gemeinschaftsposition in Hinblick auf die zweite Weltklimakonferenz in Genf untermauert werden könne. Weiterhin empfahl der Rat, daß die Gemeinschaft und ihre Mitgliedstaaten alle möglichen Schritte unternehmen sollten, damit bald eine Klimakonvention und die dazugehörigen Protokolle, einschließlich eines Protokolls über den Schutz der Tropenwälder, angenommen werden könnten (32).

Zwischenzeitlich wurde in verschiedenen Gesprächen mit hochrangigen Repräsentanten der jetzigen italienischen Präsidentschaft im Europäischen Rat auf die Position der Enquete-Kommission in bezug auf die Ausgestaltung eines internationalen Vertragswerks zum Schutz der Erdatmosphäre hingewiesen (vgl. Abschnitt G, 1. Kapitel).

Hinzuzufügen ist, daß die Gemeinschaft auch an den Arbeiten in den drei Arbeitsgruppen des im November 1988 gegründeten IPCC teilnimmt.

Aus diesen bisherigen Aktivitäten der EG-Organe ergibt sich, daß die Gemeinschaft bis jetzt nicht auf allen Feldern einer Rahmenkonvention zur Reduktion energiebedingter klimarelevanter Spurengasemissionen innergemeinschaftlich tätig geworden ist. Nach den hier einschlägigen Grundsätzen über die Verteilung der Außenkompetenz zwischen der EG und den Mitgliedsstaaten besitzt die EG keine ausschließliche Außenkompetenz. Vielmehr bestehen parallele Zuständigkeiten für Mitgliedstaaten und Gemeinschaft. Für die Ratifikation einer Konvention wäre daher ein gemischtes Abkommen möglich, das heißt, die Europäische Wirtschaftsgemeinschaft (EWG) und die Mitgliedstaaten können sich nebeneinander als Vertragsparteien an der auszuhandelnden Konvention beteiligen. Für die Finanzierung und Umsetzung der Konvention wären grundsätzlich die Mitgliedstaaten gemäß Art. 130 r Abs. 4 S.2 EWGV (Vertrag zur Gründung der Europäischen Wirtschaftsgemeinschaft) verantwortlich.

## 2.2 Aktivitäten verschiedener Mitgliedstaaten

Eine eingehende Besprechung der verschiedenen Ansätze einer Politik zur Eindämmung des zusätzlichen Treibhauseffekts in den einzelnen Mitgliedstaaten der EG kann hier aus Platzgründen nicht erfolgen. Es sei hier jedoch auf die Niederlande hingewiesen, die in der Diskussion um den zusätzlichen Treibhauseffekt eine bemerkenswerte Rolle spielen. Diese wurde den Niederlanden unter anderem dadurch zuteil, daß sie als Veranstalter einer Anzahl von Expertentagungen und Konferenzen hervortraten, unter denen die Konferenzen von Den Haag vom März 1989 und die von Noordwijk zu Anfang November 1989 hervorzuheben sind. Beide Konferenzen sind wichtige Orientierungspunkte der internationalen Bemühungen zur Eindämmung des zusätzlichen Treibhauseffektes. Außerdem spielen die Niederlande durch die im neuen Regierungsprogramm von 1989 enthaltenen Vorschläge zur Umweltpolitik, zum Beispiel zur CO<sub>2</sub>-Steuer, eine Vorreiterrolle. Geplant ist eine Reduzierung von CO<sub>2</sub> um 2 Prozent jährlich bis zur Jahrtausendwende.

Die Haltung Großbritanniens ist gekennzeichnet durch eine zunächst nur sehr vorsichtige Befürwortung einer internationalen Politik zur Eindämmung des zusätzlichen Treibhauseffekts, die in jüngster Zeit zunehmend aufgeschlossener wird. Grundsätzlich wird ein internationales Rahmenübereinkommen befürwortet, das möglichst bis 1992 vorliegen soll. Weiterhin erklärte der britische Vertreter bei den Vereinten Nationen, dem Rahmenübereinkommen sollten sachbereichsspezifische Ausführungsprotokolle hinzugefügt werden, sobald wissenschaftliche Ergebnisse dieses erforderten und erlaubten. Es werde einfacher sein, über die Regelungsinhalte der Protokolle zu entscheiden, nachdem das IPCC 1990 seinen Bericht abgegeben habe (33). Hier spiegelt sich die damalige Haltung der britischen Regierung wider, zunächst eine weitgehende wissenschaftliche Klärung abzuwarten, bevor Maßnahmen ergriffen werden. Diese Haltung wurde in Großbritannien unter anderem in einem vom Wissenschafts- und Technologieausschuß des House of Lords im Dezember 1989 fertiggestellten Bericht kritisiert. Allerdings stockte die Regierung die entsprechenden Forschungsetats tatsächlich erheblich auf.

Eine sehr eindeutige Haltung vertritt die britische Regierung zur Institutionenfrage: UNEP und WMO sollen gestärkt werden, neue Institutionen werden abgelehnt. In diesem Zusammenhang sind die Anmerkungen des britischen Gesandten bei den Vereinten Nationen von Interesse, der einen Fortbestand des IPCC als Sekretariat für ein internationales Klimavertragswerk befürwortet und auch eine zentrale Rolle des UN-Sicherheitsrats für möglich hält (34).

Kennzeichnend für die britische Position sind weiterhin die Forderungen nach einem internationalen Abkommen zur Artenvielfalt, nach einer angemessenen Berücksichtigung von Umweltkosten in den Energiepreisen, nach einer Führungsrolle der Industrieländer bei der Eindämmung des zusätzlichen Treibhauseffekts und nach einer Unterstützung der Länder der Dritten Welt, die indes nicht über einen internationalen Klimafonds abgewickelt werden soll.

Bemerkenswert war die lange Zeit fortbestehende Weigerung der britischen Regierung, bindende Verpflichtungen zu einer Limitierung der CO<sub>2</sub>-Emissionen einzugehen, und ihre Forderung, entsprechende Maßnahmen auf jeden Fall von weiteren wissenschaftlichen Erkenntnissen abhängig zu machen. Noch während der Konferenz von Bergen bestand erheblicher Widerstand der britischen Delegation (zusammen mit der US-Delegation) gegen die Aufnahme des Vorsorgeprinzips in die Abschlusserklärung des Ministertreffens. In der Folge nahm die britische Premierministerin die Fertigstellung des Berichts der IPCC-Arbeitsgruppe I (Bewertung der verfügbaren wissenschaftlichen Erkenntnisse zum zusätzlichen Treibhauseffekt) zum Anlaß, eine Stabilisierung der britischen CO<sub>2</sub>-Emissionen auf dem Niveau von 1990 bis zum Jahr 2005 anzukündigen, wenn andere Staaten sich ebenfalls an einer internationalen Reduktionsstrategie beteiligen würden. In der entsprechenden Rede legte sie dar, daß weitere Forschungsarbeiten unentbehrlich seien, daß aber politische Antworten auf den zusätzlichen Treibhauseffekt in der Gegenwart beginnen müßten (35).

### 3. Maßnahmen und Initiativen anderer Länder

Der folgende Abschnitt gibt einen kurzen Überblick über die Situation in den Ländern außerhalb der EG. Die Auswahl der Länder wurde bewußt eng gehalten. Zum einen wurde damit Rücksicht auf die gebotene Kürze der Darstellung genommen. Zum zweiten waren nicht in allen Fällen ausreichende Informationen verfügbar. Weiterhin sind die Abschnitte zu einzelnen Ländern mit Ausnahme des etwas ausführlicheren Berichts über die USA auf Momentaufnahmen beschränkt worden.

#### 3.1 Skandinavien

Die skandinavischen Länder gehören ohne Ausnahme zu den Befürwortern einer aktiven Politik zum Schutz der Erdatmosphäre. Sowohl durch die Ausrichtung von internationalen Konferenzen als auch durch ihre Initiativen als Vorreiter für eine Klimapolitik spielen sie eine beachtenswerte Rolle. Gemeinsam haben sie im Nordischen Rat einen Aktionsplan zur Kontrolle der Luftverunreinigung verabschiedet, der eine Reduzierung von CO<sub>2</sub>-Emissionen umfaßt, ohne jedoch konkrete Ziele festzulegen.

##### 3.1.1 Norwegen

Die Regierung Norwegens ist der Auffassung, daß der Klimaschutz im Zentrum der internationalen Umweltpolitik der neunziger Jahre stehen wird. Alle Industrieländer sollten größere Anstrengungen unternehmen. Ziel der norwegischen Regierung werde es auch sein, die CO<sub>2</sub>-Emissionen in dieser Dekade zu stabilisieren und danach zu reduzieren, wobei allerdings einseitige norwegische Maßnahmen ausgeschlossen werden.

Zielkonflikte in der norwegischen Politik ergeben sich daraus, daß es einerseits großer Produzent und Exporteur von Erdöl und Erdgas ist, andererseits aber eine wirksame Klimaschutzpolitik fordert. Der Ausbau der Förderkapazitäten und -mengen wird fortgesetzt und wird wahrscheinlich auch zu einer Erhöhung des norwegischen Anteils auf dem Weltöl- und Erdgasmarkt führen. Die Abhängigkeit der Wirtschaft und des Staatshaushalts von der Förderung ist trotz der beabsichtigten Verbesserung der Industriestruktur erheblich. Für das Haushaltsjahr 1991 sind eine Reihe von Umweltsteuern geplant. Dabei ist Norwegen allerdings darauf bedacht, seine Wettbewerbsfähigkeit nicht zu gefährden. Bereits im Haushaltsjahr 1990 wurde die Benzinsteuern erhöht. Weitere Maßnahmen betrafen Altöl, Batterien und FCKW.

Auf internationaler Ebene befürwortet Norwegen ein Klimavertragswerk mit bindenden Verpflichtungen für die Vertragsparteien sowie die Einrichtung einer Klimainstitution mit weitreichenden Kompetenzen. Teil dieses Klimavertragswerkes solle auch ein Klimafonds werden, in den nach einem Beschluß des norwegischen Parlaments 0,1 Prozent des Bruttonozialprodukts (BSP) eingezahlt werden sollen unter der Voraussetzung, daß andere Länder ebenso verfahren.

### 3.1.2 Finnland

Auch Finnland steht einer Klimapolitik sehr aufgeschlossen gegenüber und hat von Beginn an im IPCC aktiv mitgearbeitet. Zum 1. Januar 1990 wurden einige Umweltsteuern eingeführt, darunter die erste CO<sub>2</sub>-Besteuerung Europas mit einem Tarif von 6,10 Dollar pro Tonne CO<sub>2</sub>. Weitere Maßnahmen sind ein Erlaß der Umsatzsteuer auf bestimmte ökologisch positiv zu beurteilende Produkte, Abgaben auf Altöl, Einwegflaschen und – ab Juni 1990 – phosphathaltigen Dünger. Das Steueraufkommen wird um etwa 1 Prozent steigen. Trotz einiger umweltpolitischer Zweckbindungen wird deshalb vermutet, daß nicht zuletzt finanzpolitische Überlegungen diese Steuerreform inspiriert haben. Weitere Umweltsteuern sind für die Zeit nach den Parlamentswahlen im nächsten Jahr vorgesehen.

Auch Finnland hat eine jährliche Zahlung an einen eventuell einzurichtenden Klimafonds zugesichert, wenn andere Länder sich beteiligen.

### 3.1.3 Schweden

Schweden, wie seine Nachbarstaaten ein entschlossener Befürworter der Politik zum Schutz der Erdatmosphäre, wird 1990 eine Reihe von Umweltsteuern einführen beziehungsweise bestehende Steuern erhöhen:

- Erhebung einer Mehrwertsteuer auf Energie;
- Erhöhung der Benzinsteuern;
- Erhebung einer Steuer auf SO<sub>2</sub>-Emissionen (30 Schwedische Kronen (Skr) pro kg Schwefel), auf NO<sub>x</sub> (40 Skr pro kg) und auf CO<sub>2</sub>. Letztere beträgt 0,25 Skr pro kg Kohlenstoff.

Teilweise werden bestehende Energie- und Verkehrsdienstleistungen ersetzt. Weitere Umweltsteuern sind in der Diskussion.

Diese Steuern sind im Zusammenhang mit anderen Elementen der schwedischen Energiepolitik zu sehen. Ein Beschluß des schwedischen Parlaments verpflichtet dazu, die bestehenden 12 Kernkraftwerke bis 2010 abzuschalten, die ersten 1995 beziehungsweise 1996. Ein Ausbau der Wasserkraft ist nicht mehr möglich. Beide Energieträger decken etwa 50 Prozent des Strombedarfs. Die Energiekommission der Regierungspartei hat wegen einer möglichen Energielücke angeregt, die von der Regierung gefaßten Beschlüsse über die Reduzierung von CO<sub>2</sub>-Emissionen fallenzulassen. Das wird gleichfalls aus umweltpolitischen Gründen nicht leicht möglich sein.

### 3.2 Kanada

Auch Kanada sollte hervorgehoben werden, das als Veranstalter der schon erwähnten Konferenz „The Changing Atmosphere: Implications for Global Security“ im Juni 1988 in Toronto sowie des „International Meeting of Legal and Policy Experts – Protection of the Atmosphere“ im Februar 1989 in Ottawa der Diskussion und der internationalen Politik zum Schutz

des Erdklimas wichtige Impulse vermittelt hat. Hier sei auch auf die sehr eigenständige Haltung Kanadas zur Konstruktion einer globalen Atmosphären-Konvention aufmerksam gemacht.

### 3.3 USA

In den USA veränderte sich die Situation mit dem Amtsübergang auf Präsident Bush Anfang 1989, der sich als ersten Umweltpäsidenten der Vereinigten Staaten bezeichnete, seit seinem Regierungsantritt den Belangen des Umweltschutzes größeres Verständnis als sein Amtsvorgänger entgegenbrachte und im Gegensatz zu diesem eine Klimakonvention im Prinzip unterstützt.

Im Kontrast dazu steht die zumindest bis jetzt zu beobachtende Zurückhaltung der Regierung, auf nationaler oder auch internationaler Ebene Schritte zur Stabilisierung oder Reduzierung der Emissionen von Treibhausgasen einzuleiten. Vielmehr schien die US-Regierung eher geneigt, die Festlegung oder Empfehlung konkreter Reduzierungsschritte – außer bei den FCKW – zu verhindern, wie ihr Verhalten in verschiedenen internationalen Konferenzen vermuten ließ.

Bei der Konferenz in Noordwijk im November 1989 schlugen die niederländischen Gastgeber der Konferenz einen Resolutionsentwurf vor, der die Industrieländer zu einer Stabilisierung der CO<sub>2</sub>-Emissionen bis zum Jahr 2000 und zu einer anschließenden Reduzierung um 20 Prozent bis zum Jahr 2005 aufforderte. Neben Großbritannien, Japan und der UdSSR wehrten sich auch die USA gegen eine solche Entschliebung, obwohl sie die Staaten nur politisch verpflichtet nicht aber juristisch gebunden hätte.

Die amerikanische Haltung wurde während der „White House Conference on Science and Economics Research Related to Global Change“, die am 17. und 18. April 1990 in Washington D.C. auf Ministerebene stattfand, besonders deutlich. Das Ziel der Konferenz wurde von einem ihrer Initiatoren folgendermaßen ausgedrückt: Voraussichtlich werde ein Bericht erarbeitet werden, der gemeinsame Maßnahmen mit dem Ziel des Ausbaus von Forschung und Zusammenarbeit zwischen den Staaten definiere. Die USA würden der Konferenz darüber hinaus eine Reihe von konkreten Vorschlägen unterbreiten, wie etwa den Vorschlag über ein internationales Forschungsprogramm zu den weltweiten Klimaveränderungen, das dem nationalen Programm der USA auf internationaler Ebene vergleichbar sei (36).

Die Konferenz erzeugte bei vielen, insbesondere bei ausländischen, Teilnehmern den Eindruck, daß mit dem Hinweis auf wissenschaftliche Unsicherheiten über die Klimaveränderungen, ihre Ursachen und Folgen nur konkrete Maßnahmen hinausgezögert werden sollten. Erst im Verlauf der Konferenz, nachdem die Gastgeber ohne Rücksprache mit den Gastdelegationen eine Schlußerklärung vorgelegt hatten, die von einigen Staaten zurückgewiesen wurde, ergab sich eine Annäherung an die Staaten, die einer Politik zur Eindämmung des zuzustichlichen Treibhauseffektes gegenüber positiver eingestellt sind. Präsident Bush hob



schließlich in seiner zweiten Rede hervor, die USA verstünden weder die Forschung als Ersatz für Maßnahmen noch den Hinweis auf Unsicherheiten als Alibi für Nichthandeln.

Die amerikanische Verhandlungsposition hat sich allerdings, wie die weiteren internationalen Konferenzen gezeigt haben, kaum verändert. So fand sich die US-Delegation bei der ECE-Konferenz über dauerhafte Entwicklung in Bergen (16. Mai 1990) in der Abschlusserklärung zu keiner Formulierung bereit, die über die Forderung hinausgeht, daß die teilnehmenden Parteien eine Stabilisierung von CO<sub>2</sub> und anderen Treibhausgasen sobald wie möglich befürworten (37). Insbesondere wurde nicht die Forderung akzeptiert, daß die Teilnehmerstaaten bis zur Zweiten Weltklimakonferenz im Herbst 1990 quantitative Reduktionsziele und -zeitpläne bekanntgeben sollten. Große Zurückhaltung übte die Delegation auch bei der Aufnahme des Vorsorgeprinzips und der finanziellen Unterstützung für die Entwicklungsländer oder die osteuropäischen Länder einschließlich der Sowjetunion in die Schlusserklärung (38).

Es erscheint lohnenswert hervorzuheben, daß sich die Einstellung verschiedener Teile der amerikanischen Regierung durchaus voneinander unterscheidet. Anhand eines groben Rasters läßt sich dies so beschreiben: Wenig Aufgeschlossenheit gegenüber einer wirksamen Politik zur Eindämmung des zusätzlichen Treibhauseffekts ist im Stab des Weißen Hauses und den damit befaßten Präsidentenberatern, im Council of Economic Advisers sowie im Energieministerium festzustellen. Eine positive Einstellung zur Klimapolitik vertreten das State Department und vor allem die Environmental Protection Agency (EPA). Allerdings scheint gerade diese oberste nationale Umweltschutzbehörde der USA zur Zeit in der amerikanischen Klimapolitik keine zentrale Rolle zu spielen. An dieser Stelle ist der ergänzende Hinweis angebracht, daß in den Vereinigten Staaten kein Ministerium federführend für die Klimapolitik zuständig ist. Es erscheint durchaus wahrscheinlich, daß zukünftige Wahltermine der Bush-Administration noch vor Beginn der zweiten Weltkonferenz für Umwelt und Entwicklung in Brasilien im Jahr 1992 ein Überdenken ihrer Standpunkte nahelegen werden.

Außerhalb der Regierung schlugen sich verschiedene Initiativen und Bemühungen, Maßnahmen zur Vermeidung oder Abschwächung des zusätzlichen Treibhauseffekts durchzusetzen, in mehreren Gesetzentwürfen nieder. Deren umfangreichster ist der Entwurf „The Global Warming Prevention Act“ der Abgeordneten Claudine Schneider. Kernpunkte dieses Entwurfs sind eine Senkung der US-amerikanischen CO<sub>2</sub>-Emissionen und eine internationale Vereinbarung zum Schutz der Erdatmosphäre, mit der eine weltweite Senkung der CO<sub>2</sub>-Emissionen bis zum Jahre 2005 um 20 Prozent gegenüber dem Niveau von 1987 angestrebt werden soll.

### 3.4 Japan

Die Gefahren einer Erwärmung der Erdatmosphäre und die Notwendigkeit einer globalen Umweltpolitik sind in Japan durchaus in das Bewußtsein von Regie-

rung und Öffentlichkeit gedrungen. Die Regierung trug dem Rechnung, indem sie im Mai 1989 einen „Interministeriellen Rat für Globalen Umweltschutz“ einsetzte. Außerdem wird im japanischen Umweltministerium die Einrichtung eines „Global Departement“ vorbereitet. Es drängt sich aber mitunter die Vermutung auf, daß viele Verlautbarungen der „Global Warming“-Rhetorik zuzuordnen und nicht in allen Fällen von einem wirklichen Anpassungs- und Durchsetzungswillen begleitet sind.

### 3.5 Indien

In Indien kommt dem Ziel der wirtschaftlichen Entwicklung zur Zeit wie in fast allen anderen Ländern größere Bedeutung zu als dem Umweltschutz. Der gute Wille, der im Umweltministerium an den Tag gelegt wird, findet deswegen wenig Eingang in die politische und wirtschaftliche Praxis. Industrieller Umweltschutz, Wasserreinhaltung, Bekämpfung von Bodenerosion und -versalzung genießen höhere Priorität als die Eindämmung des zusätzlichen Treibhauseffektes. Die Regierung zieht sich häufig auf das Argument zurück, daß Indien nur wenig zum zusätzlichen Treibhauseffekt und zur Zerstörung der Ozonschicht beitrage.

In bezug auf den zusätzlichen Treibhauseffekt scheint aber das Argument des geringfügigen Beitrags zu den Treibhausgasen jedenfalls für die Zukunft nicht ganz überzeugend. Größe und Wachstum der indischen Bevölkerung sowie das erhebliche Wachstumspotential der indischen Wirtschaft lassen einen bedeutsamen Anstieg der Emissionen etwa von CO<sub>2</sub> erwarten. Bei einem prognostizierten Anstieg des Energieverbrauchs um 80 bis 130 Prozent bis zum Jahr 2000 würden so zum Beispiel die CO<sub>2</sub>-Emissionen um 80 bis 95 Prozent auf 852 bis 925 Mio. t steigen. Der Primärenergieverbrauch wird zur Zeit zu etwa 55 Prozent durch die Kohle gedeckt (39). Die Kohleproduktion soll von zur Zeit etwa 211 Millionen Tonnen pro Jahr auf etwa 400 Millionen Tonnen in zehn Jahren expandieren.

Bindende Reduktionsverpflichtungen und Sanktionen in einem Vertragswerk zum Schutz der Erdatmosphäre werden abgelehnt. Indien steht auf dem Standpunkt, daß die Finanzierung von klimarelevanten Umweltschutzmaßnahmen in den Entwicklungsländern durch die Industrieländer zu erfolgen habe. Eine differenzierende Behandlung von Industrieländern und Entwicklungsländern reiche nicht aus, vielmehr sollen die Anpassungslasten einer Reduktionspolitik von den Industrieländern getragen werden. Gesetzliche Maßnahmen zur Limitierung von Treibhausgasemissionen sind nicht zu erwarten.

### 3.6 Volksrepublik China

Die Volksrepublik China steht mit einem Energieverbrauch von 920 Millionen Tonnen Steinkohleeinheiten (SKE) an dritter Stelle der Energieverbrauchsländer in der Welt. Hinzu kommen 200 Millionen Tonnen SKE durch die Verfeuerung von Holz. Der Primärenergieverbrauch wird auch in Zukunft weiter steigen, und zwar bei einem geschätzten Wirtschafts-

wachstum von sechs bis sieben Prozent pro Jahr bis zum Jahr 2000 um jährlich etwa vier Prozent (40).

Etwa 76 Prozent des Primärenergieverbrauchs werden von der Steinkohle – meist minderer Qualität – getragen (41). Der Anteil der Kohle am Primärenergieverbrauch wird bis zum Jahr 2000 in etwa konstant bleiben oder geringfügig abnehmen. In absoluten Zahlen wird der Kohleeinsatz dagegen erheblich zunehmen (42). Es ist geplant, die Förderung von Kohle um 400 Millionen Tonnen auf 1,4 Milliarden Tonnen SKE, die Förderung von Erdgas von 16 Milliarden auf 30 Milliarden Kubikmeter und die Förderung von Erdöl von 130 Millionen Tonnen auf 200 Millionen Tonnen zu erhöhen.

Die CO<sub>2</sub>-Emissionen der Volksrepublik China beliefen sich im Jahr 1986 auf 1,9 Milliarden Tonnen, das sind 13 Prozent der gesamten weltweiten Emissionen. Wenn der Primärenergieverbrauch bis zur Jahrtausendwende im prognostizierten Ausmaß ansteigt, werden die CO<sub>2</sub>-Emissionen auf etwa 3,5 Milliarden Tonnen zunehmen. Die „Tendenz“ des Treibhauseffekts wird in China gesehen. Zumindest nach einer inoffiziellen Sicht werden die ökonomischen Folgen aber wahrscheinlich übertrieben. Bei einer Verdoppelung des CO<sub>2</sub>-Gehalts in der Erdatmosphäre seien sogar einige positive Effekte zu erwarten, wie zum Beispiel eine um 10 bis 40 Prozent verbesserte Produktivität in der Landwirtschaft (43). Nach Ansicht dieses Autors ist es nicht weise, eine strikte CO<sub>2</sub>-Reduzierungspolitik zu verfolgen. Vielmehr schlägt er – in Anlehnung an die US-amerikanische „No Regret-Policy“-Maßnahmen vor, die nichts kosten. Nach offizieller Sicht wird die Notwendigkeit von Maßnahmen der rationellen Energieverwendung und Energieeinsparung anerkannt. Man sieht sich allerdings nicht im Stande, die für die entsprechenden Importe notwendigen Mittel bereitzustellen.

Zwar verfügt die Volksrepublik China grundsätzlich über große Rationalisierungsreserven im Energiesektor. Dennoch sprechen eine Reihe von Faktoren dagegen, daß sie in absehbarer Zeit bereit und fähig sein könnte, zur globalen Reduktion der CO<sub>2</sub>-Emissionen beizutragen:

- Die Volksrepublik China ist als Entwicklungsland vorrangig daran interessiert, wirtschaftlich Anschluß an die industrialisierten Länder zu finden, und wird daher nicht bereit sein, ihre Wachstumschancen durch eine restriktive CO<sub>2</sub>-Politik zu vermindern.
- Als Rohstoffland, das insbesondere über große Kohlereserven verfügt, kann ihr nicht daran gelegen sein, dieses „Kapital“ durch eine internationale Konvention entwerten zu lassen.
- Es ist zweifelhaft, ob es der Volksrepublik China in absehbarer Zeit gelingt, die Schwächen ihres Wirtschaftssystems zu überwinden.
- Kapital- und Devisenmangel behindern die Modernisierung und ökologische Umorientierung der Wirtschaft (44).

Aufschlußreich ist in diesem Zusammenhang, daß die Volksrepublik China das Wiener Übereinkommen zum Schutz der Ozonschicht unterzeichnet hat, nicht

jedoch das Protokoll von Montreal. Ob und wann die Unterzeichnung dieses Protokolls erfolgt, hängt mit den damit verbundenen Fragen, insbesondere den finanziellen, zusammen. Möglicherweise wird die Unterzeichnung von großzügigen finanziellen Leistungen seitens der Industrieländer abhängig gemacht.

### 3.7 Andere Entwicklungsländer

Als ein Sonderfall unter den Entwicklungsländern ist die Gruppe der wirtschaftlich schnell wachsenden Schwellenländer in Asien und Lateinamerika anzusehen. Zu den Ländergruppen, deren Interessen bei den Verhandlungen zu einer internationalen Konvention in Rechnung gestellt werden müssen, gehören außerdem auch die Länder, die fossile Energieträger produzieren und exportieren, wie zum Beispiel die OPEC-Länder. Die Folge einer CO<sub>2</sub>-Minderungspolitik wäre, daß die Nachfrage nach fossilen Energieträgern am Weltmarkt zurückgehen würde. Die Exportmöglichkeiten der Anbieter fossiler Energieträger würden eingeschränkt, ihre Exporterlöse sänken. Die Vermögenswerte der Energieressourcen würden sehr stark verändert, fossile Ressourcenbestände würden entwertet (Ausnahme vielleicht Erdgas), CO<sub>2</sub>-freie Stoffe würden aufgewertet. Diese Belastungen der Anbieter fossiler Energieträger und der Staaten mit hohen Energieexporten sind unabhängig davon, ob und in welchem Umfang diese Staaten im Rahmen der Konvention Reduktionsverpflichtungen übernehmen. Die daraus resultierenden Schlußfolgerungen für die wirtschaftlichen Perspektiven der OPEC-Länder sind ebenfalls bei der Aushandlung eines internationalen Übereinkommens zu berücksichtigen.

## 4. Bestehende und vorgeschlagene internationale Vereinbarungen

Bereits zum jetzigen Zeitpunkt bestehen internationale Vereinbarungen, die einzelne Ursachen des zusätzlichen Treibhauseffektes erfassen. Solche Vereinbarungen existieren schon im Falle der FCKW, die mit einem Anteil von 20 Prozent den zusätzlichen Treibhauseffekt mitverursachen, sowie in Hinblick auf die Reduktion von Schwefel- und Stickstoffemissionen. Darüber hinaus wurden bereits Vorschläge entwickelt, mit denen der durch die Vernichtung der tropischen Wälder entstehende Beitrag zum zusätzlichen Treibhauseffekt rückgeführt werden soll.

### 4.1 Wiener Übereinkommen zum Schutz der Ozonschicht und Montrealer Protokoll über Stoffe, die zu einem Abbau der Ozonschicht führen

Nach langjährigen Vorbereitungen wurde am 22. März 1985 das Wiener Übereinkommen zum Schutz der Ozonschicht unterzeichnet. Nach der Ratifikation durch 20 Staaten trat das Übereinkommen im August 1988 in Kraft. Das Wiener Übereinkommen stellt nach Ansicht der Enquete-Kommission in zweierlei Hinsicht einen internationalen Präzedenzfall dar.

Zum einen ist es damit erstmals gelungen, einen Rahmen für eine globale Vereinbarung über die Zusammenarbeit in der Bekämpfung der Umweltverschmutzung festzulegen. Zum zweiten wurde versucht, im Rahmen einer internationalen Vereinbarung ein Problem vorzusehen und abzuwenden anstatt seine Folgen zu beseitigen, das heißt, es kam auf internationaler Ebene zum ersten Mal zur vertraglichen Festlegung des Vorsorgeprinzips.

Als Rahmenkonvention enthält das Übereinkommen keine konkreten Maßnahmen. Die erste Folgevereinbarung zum Wiener Übereinkommen war das Montrealer Protokoll vom 16. September 1987, das Anfang 1989 in Kraft getreten ist und zwischenzeitlich auf der Londoner Vertragsstaatenkonferenz modifiziert wurde (vgl. Abschnitt D, 5. Kapitel, Nr. 1.1.3).

#### 4.2 Internationale Konvention zum Schutz tropischer Wälder

Ein zweites eng mit dem Problemkomplex „Zusätzlicher Treibhauseffekt“ verknüpftes Sachgebiet, auf dem die Bemühungen und Initiativen auf internationaler Ebene bereits zu konkreten Maßnahmen und Vereinbarungen geführt haben, ist die Erhaltung der Tropenwälder. Deren Vernichtung trägt mit etwa 15 Prozent zum zusätzlichen Treibhauseffekt bei.

Hier wurde zunächst 1986 im Rahmen der FAO der Tropen-Forstwirtschafts-Aktionsplan (Tropical Forestry Action Plan, TFAP) verabschiedet, der als Koordinierungsgrundlage für die internationale Entwicklungshilfe zur Forstentwicklung und zum Waldschutz in den Tropen dienen soll, sich mittlerweile allerdings erheblicher Kritik ausgesetzt sieht.

Unter anderem aus diesem Grund hat die Enquete-

Kommission in ihrem zweiten Bericht zum Schutz der tropischen Wälder auf internationaler Ebene ein Sofortprogramm zum Schutz der tropischen Wälder und eine Internationale Konvention gefordert. Diese Maßnahmen sind Teile eines umfassenden und weitreichenden Schutzkonzepts, mit dem schnellstmöglich die globale Rückführung der Tropenwaldvernichtung und, wo immer möglich, ein sofortiger Stopp erreicht werden soll. Insbesondere das Sofortprogramm soll dazu dienen, schnellstmöglich

- geplante oder bestehende Maßnahmen zum Schutz besonders gefährdeter Primärwaldgebiete durchzuführen;
- flächendeckende Agroforstprojekte in Asien, Afrika und Lateinamerika durchzuführen;
- den Aufbau von Brennholz- und Nutzholzplantagen sowie einer umweltverträglichen Energieversorgung in der Dritten Welt zu fördern;
- die Aufforstung entwaldeter und die Wiedergewinnung versteppter Flächen für die Landwirtschaft herbeizuführen und
- integrierte Regionalschließungsmaßnahmen unter Einfluß von Handels-, Gewerbe- und Arbeitsplatzförderung außerhalb der Tropenwälder herbeizuführen.

Eine entscheidende Maßnahme zur Erhaltung der Tropenwälder und damit auch zur Unterbindung des von der Tropenwaldvernichtung herrührenden Anteils am zusätzlichen Treibhauseffekt ist nach Auffassung der Enquete-Kommission eine Internationale Konvention zum Schutz der tropischen Wälder. Dieses Übereinkommen soll folgende allgemeinverbindliche Verpflichtungen enthalten:

Diejenigen Staaten, die nicht über eigene Tropenwaldvorkommen verfügen, sind aufgerufen, ihrer Mitverantwortung für den Schutz der tropischen Wälder durch die Unterzeichnung des Übereinkommens Ausdruck zu geben und sich zu verpflichten, die Tropenwaldländer durch

- die Bereitstellung programmgebundener finanzieller Mittel, wenn möglich in Form nicht rückzahlbarer Zuschüsse,
- umfangreiche Forschungsmaßnahmen und -kooperation sowohl in den Tropen- wie in den Industrieländern sowie einen intensiven Austausch der Forschungsergebnisse,
- den Transfer umwelt- und sozialverträglicher Technologien in den Bereichen Forst- und Landwirtschaft sowie Umwelt- und Energietechnik und
- die anderweitige Bereitstellung von Fachwissen in den Bereichen Landwirtschaft, Forstwirtschaft und Regionalplanung

zu unterstützen, sowie

- keine Aktivitäten im eigenen Land, im Rahmen ihrer außenwirtschaftlichen Beziehungen oder in Tropenwaldländern durchzuführen oder zu unterstützen, die direkt oder indirekt zur Waldzerstörung beitragen. Dabei müssen allerdings die Lebensgrundlagen und die verbesserte Grundversorgung der Bevölkerung der Tropenwaldländer mit dem Ziel ihrer Lebenssicherung gewährleistet werden.

Weiterhin sollten sich die Industrienationen verpflichten, auf der Basis eines dazu parallel angestrebten internationalen Übereinkommens ihrerseits umgehend Maßnahmen einzuleiten, die geeignet sind, von ihnen ausgehende globale Umweltgefährdungen zu beseitigen. Dies betrifft vor allem die drastische Verminderung der energiebedingten Spurengasemissionen.

Diejenigen Unterzeichnerstaaten, die über Tropenwaldvorkommen verfügen, sollten sich dazu verpflichten,

- ihre Primärwälder weitestmöglich zu erhalten und zu diesem Zweck unter anderem verstärkt Schutzgebiete einzurichten,
- ihre anderen Wälder nachhaltig zu bewirtschaften,
- Aufforstungs- und Regenerationsmaßnahmen durchzuführen, damit langfristig neue Sekundärwälder entstehen können, und

- die kulturelle Identität und die Lebensräume der indigenen Gesellschaften zu schützen.

Neben diesen allgemeinen Verpflichtungen sollte das Übereinkommen zur Konkretisierung der Maßnahmen ein Protokoll vorsehen und dessen inhaltlichen Rahmen vorgeben.

Dieses Protokoll soll Rechte und Pflichten der Unterzeichnerstaaten im einzelnen festlegen und dabei insbesondere auch Fragen der Finanzierung, der Sanktionsmechanismen und der Kontrolle der Vertragsvereinbarungen regeln.

Zu schaffen ist ein projekt- und programmorientierter internationaler Treuhandfonds zum Schutz der Tropenwälder, der federführend vom Umweltprogramm der Vereinten Nationen (UNEP) unter fachlicher Mitwirkung der Ernährungs- und Landwirtschaftsorganisation der Vereinten Nationen (FAO) und der Weltbank betreut werden sollte. Dieser Treuhandfonds sollte über ein Mittelvolumen pro Jahr in Höhe von 10 Milliarden DM verfügen (vgl. 2. Bericht, Abschnitt A).

Diese beiden Vorschläge für internationale Maßnahmen haben bei dem Wirtschaftsgipfel in Houston bei den Teilnehmern positive Resonanz gefunden. Das von den Staats- und Regierungschefs vorgeschlagene Pilotprogramm für Brasilien, mit dem gezielt in diesem Land die Tropenwaldvernichtung gestoppt werden soll, ist der Versuch, das von der Enquete-Kommission vorgeschlagene Sofortprogramm zum Schutz der tropischen Wälder exemplarisch in einem bedeutenden Tropenwaldland umzusetzen. Die Teilnehmer des Gipfels betonen in ihrer Wirtschaftserklärung ausdrücklich, daß die bei diesem Pilotprogramm gewonnenen Erfahrungen anderen Ländern, die mit dem Problem der Zerstörung tropischer Wälder konfrontiert seien, unverzüglich zur Verfügung gestellt werden sollten. Außerdem bieten die Teilnehmer ihre aktive Unterstützung an. Sie erklären sich zu einem neuen Dialog von Industrie- und Entwicklungsländern über Mittel und Wege zur Unterstützung ihrer Bemühungen bereit.

Besonders zu begrüßen ist, daß sich erstmals ein Gremium auf Regierungsebene für ein globales Übereinkommen oder eine globale Vereinbarung zum Schutz der Wälder ausgesprochen hat, wodurch die Zerstörung der tropischen Wälder aufgehalten, die Artenvielfalt geschützt und positive Maßnahmen zur Erhaltung der Wälder stimuliert werden sollen. Auch die Zeitvorstellungen zur Realisierung dieses Übereinkommens entsprechen den Forderungen der Enquete-Kommission, indem das Übereinkommen oder die Vereinbarung ebenso wie die internationale Konvention über Klimaveränderungen bis 1992 fertiggestellt werden soll. Weiterhin ist bemerkenswert, daß der Wirtschaftsgipfel die Anregungen der Enquete-Kommission und anderer nationaler und internationaler Organisationen, die auf dem Gebiet der Tropenwalderhaltung tätig sind, aufgegriffen hat, indem er die Reform des Tropen-Forstwirtschafts-Aktionsplans forderte. Die Erhaltung der tropischen Wälder sowie der Schutz der Artenvielfalt seien stärker zu berücksichtigen (45).

#### **4.3 Übereinkommen über weiträumige grenzüberschreitende Luftverunreinigung und daraus abgeleitete Protokolle**

Ferner ist das „Übereinkommen über weiträumige grenzüberschreitende Luftverunreinigung“ (sog. Genfer Luftreinhaltkonvention) relevant, das im Rahmen der Wirtschaftskommission der Vereinten Nationen für Europa (UN-Economic Commission for Europe, ECE) verhandelt und im November 1979 zum Zwecke der Bekämpfung der Emission von luftverunreinigenden Stoffen unterzeichnet wurde.

Die internationale Konvention zur Luftreinhaltung verpflichtet die Vertragsparteien, die Luftverunreinigung einzudämmen sowie möglichst schrittweise zu verringern und zu verhindern. Auch sollen die Vertragsparteien Politiken und Strategien einschließlich der dazugehörigen Kontrollmaßnahmen erarbeiten, die der Bekämpfung der Emissionen von luftverunreinigenden Stoffen dienen. Dazu sollen sie die Luftverunreinigung und deren Auswirkungen überwachen, Informationen untereinander austauschen, sich gegenseitig konsultieren und entsprechend ihrem Bedarf in bestimmten Bereichen Forschungsarbeiten aufnehmen. Bei der Emissionsminderung sollen sie die besten verfügbaren und wirtschaftlich vertretbaren Technologien einsetzen (46).

Das Übereinkommen dient als Rahmen für eine Reihe von Protokollen, deren erstes die langfristige Finanzierung des Programms über die Zusammenarbeit bei der Messung und Bewertung der weiträumigen Übertragung von luftverunreinigenden Stoffen in Europa (EMEP) betrifft. Dieses EMEP-Programm ist in den Artikeln 9 und 10 der Genfer Konvention niedergelegt.

Das sogenannte Helsinki-Protokoll, das von der Bundesrepublik Deutschland am 9. Juli 1985 unterzeichnet wurde, regelt die Verringerung von Schwefelemissionen oder ihres grenzüberschreitenden Flusses. Mit diesem Protokoll übernehmen 21 Staaten aus Ost und West die völkerrechtliche Verpflichtung, ihre jährlichen nationalen Schwefelemissionen oder deren grenzüberschreitenden Fluß sobald wie möglich und spätestens bis 1993 um mindestens 30 Prozent gegenüber dem Niveau von 1980 zu reduzieren.

Das Sofia-Protokoll, das die Bundesrepublik Deutschland am 9. Juli 1985 unterzeichnet hat, dient der Bekämpfung von Emissionen von Stickoxiden oder ihres grenzüberschreitenden Flusses. Dieses Protokoll enthält die völkerrechtliche Verpflichtung, die jährlichen nationalen Stickstoffdioxid-Emissionen oder deren grenzüberschreitenden Fluß auf dem Stand von 1987 einzufrieren; dieses Ziel ist bis 1994 zu erreichen.

#### **5. Internationale Regierungsorganisationen**

Auf institutioneller Ebene haben sich in der Vergangenheit sowohl Internationale Regierungsorganisationen als auch von diesen eingesetzte Ausschüsse oder andere Koordinierungsorgane sowie Internationale Nicht-Regierungsorganisationen mit dem zusätzlichen Treibhauseffekt, dem von ihm ausgehenden Gefahren und Möglichkeiten zu ihrer Eindämmung be-

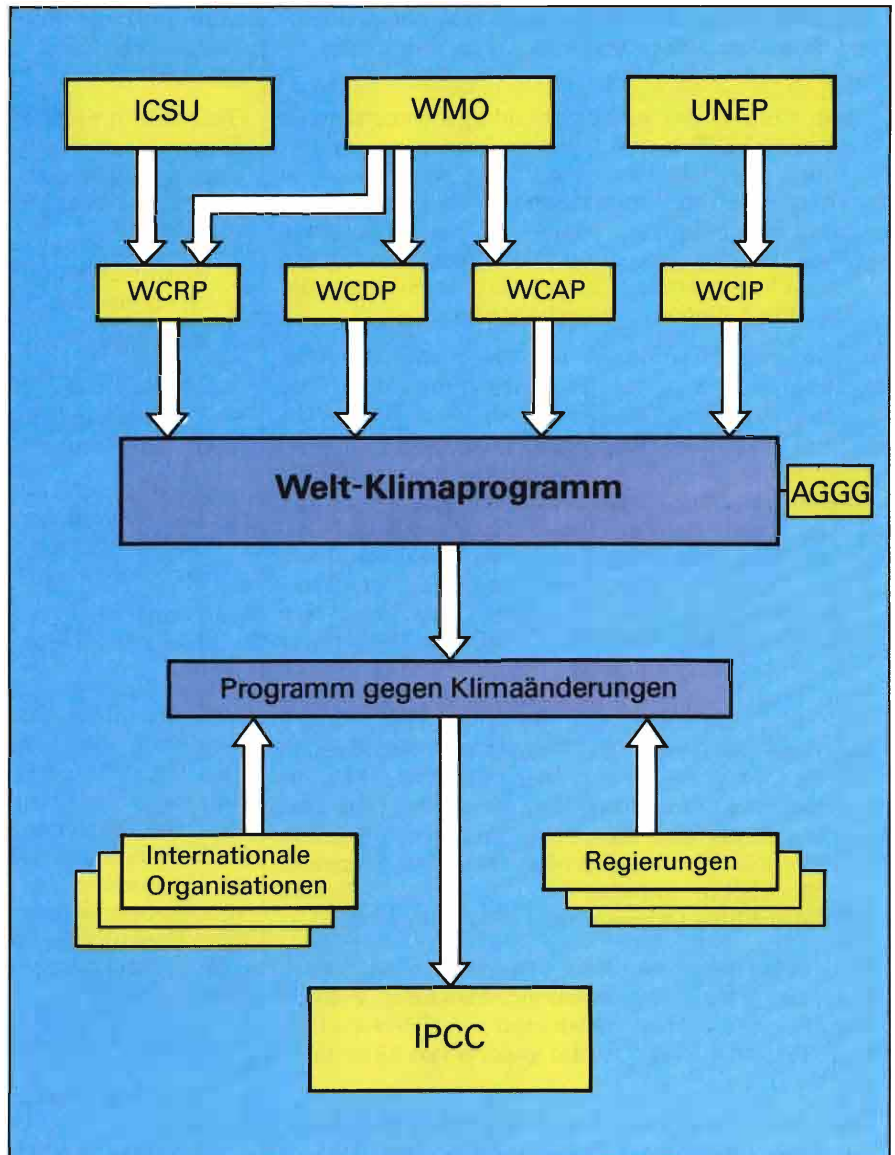


Abb. 3: Internationale Zusammenarbeit im Rahmen des Welt-Klima-Programms zur Erforschung der Auswirkungen des zusätzlichen Treibhauseffektes und der Entwicklung von politischen Strategien zur Eindämmung dieser globalen Bedrohung (47).

faßt. Zu nennen sind insbesondere UNEP, die WMO, der von beiden gegründete IPCC und der Internationale Rat wissenschaftlicher Vereinigungen (International Council of Scientific Unions, ICSU). Alle diese Organisationen arbeiten im Rahmen des Welt-Klima-Programms (WCP) zusammen.

### 5.1 Umweltprogramm der Vereinten Nationen (UNEP)

Das Umweltprogramm der Vereinten Nationen (United Nations Environment Programme, UNEP) wurde am 15. Dezember 1972 als eines der wichtigsten Ergebnisse der Stockholmer UN-Konferenz über die Umwelt des Menschen im gleichen Jahr durch die

Resolution 2997 (XXVII) der Generalversammlung der Vereinten Nationen förmlich gegründet und nahm im Februar 1973 seine Arbeit auf. Das Umweltprogramm ist die erste weltweit tätige und für alle Umweltfragen zuständige Internationale Regierungsorganisation im Bereich der Vereinten Nationen. Allerdings erhielt UNEP nicht den Status einer Sonderorganisation und führt daher zum Beispiel in der Regel nicht selbstständig Programme und Projekte durch (48). Sitz der UNEP ist Nairobi/Kenia.

Hauptorgan des UNEP ist der Verwaltungsrat (Governing Council, GC). Dieser hat gemäß der Gründungsresolution unter anderem die Aufgabe,

- die Umweltsituation in der Welt zu verfolgen, um zu sichern, daß auftretende Umweltprobleme von

großer internationaler Bedeutung in entsprechendem und angemessenem Maß von den Regierungen beachtet werden;

- den Beitrag der entsprechenden internationalen wissenschaftlich und Fachvereinigungen zur Aneignung, Einschätzung und zum Austausch von Kenntnissen und Informationen über die Umwelt und, im geeigneten Maße, zu den technischen Aspekten der Festlegung und Verwirklichung von Umweltprogrammen innerhalb des Systems der Vereinten Nationen zu erhöhen und
- den Einfluß nationaler und internationaler Umweltmaßnahmen auf die Entwicklungsländer und das Problem zusätzlicher Kosten, die den Entwicklungsländern bei der Verwirklichung von Umweltprogrammen und -projekten entstehen können, ständig zu überprüfen und zu sicher, daß derartige Programme und Projekte mit Entwicklungsplänen und Prioritäten dieser Länder im Einklang stehen (49). Im Rahmen dieser allgemeinen Aufgabenzuweisung für den Bereich Umwelt beschäftigt sich UNEP verstärkt auch mit Klimafragen. Besondere Bedeutung kommt hierbei der Mitarbeit von UNEP am Welt-Klima-Programm zu. UNEP betreut das World Climate Impact Study Programme (WCIP), in dessen Rahmen UNEP unter anderem laufend den CO<sub>2</sub>-Gehalt der Luft überprüft. Weitere Untersuchungen laufen über die Zusammenhänge zwischen Klima und Biosphäre (in Zusammenarbeit mit dem Internationalen Meteorologischen Institut in Stockholm) und über den Kohlendioxid-Einfluß auf das Klima (gemeinsam mit WMO und ICSU).

Vor dem Hintergrund dieser allgemeinen Aufgabenzuweisung ist die Entschließung 43/53 der Vollversammlung der Vereinten Nationen von 1988 zu sehen, die UNEP und die WMO unter anderem zu Aktivitäten betreffend

- der Entwicklung möglicher Strategien zur Verzögerung, Eindämmung oder Abmilderung der Auswirkungen von nachteiligen Klimaänderungen,
- der Identifizierung und möglichen Verstärkung von Aktivitäten, die zum Schutz des Klimas beitragen,
- der Benennung von Elementen, die in eine mögliche zukünftige internationale Klimakonvention aufgenommen werden sollen,

auffordert (50).

Der Verwaltungsrat der UNEP hat darauf entsprechend reagiert und den Exekutivdirektor des UNEP dazu aufgefordert, gemeinsam mit dem Generalsekretär der WMO die Vorbereitungen für die Aushandlung einer internationalen Klimakonvention zu treffen. Auf seiner Sitzung im Mai 1989 beschloß der Verwaltungsrat (Governing Council, GC) des UNEP, den Konventionsentwurf von IPCC abzuwarten, um sodann auf dieser Grundlage Verhandlungen über ein internationales Abkommen zu initiieren. Zur Vorbereitung dieser Verhandlungen soll im September 1990 gemeinsam mit der WMO eine Expertengruppe einberufen werden. Mit diesen Verhandlungen wird die Vorstellung verbunden, daß sie schon anläßlich der UN-Konferenz über Umwelt und Entwicklung im

Jahre 1992 zur Unterzeichnung von Teilen eines Vertragswerkes zum Schutze der Erdatmosphäre führen können.

Gleichzeitig empfahl der Verwaltungsrat den Regierungen und regionalen Wirtschaftsgemeinschaften, Überlegungen zur Lösung des Klimaproblems anzustellen, wobei er insbesondere folgende Maßnahmen vorschlug:

- Beitritt zum Montrealer Protokoll über Stoffe, die zu einem Abbau der Ozonschicht führen;
- Bekämpfung der Entwaldung, Förderung von Aufforstungsmaßnahmen;
- Verbesserung des Energiewirkungsgrades, Energieeinsparung;
- Verringerung der Emissionen durch verbesserte Technologie, wobei feste Ziele gesetzt werden sollten; erster Schritt sollte die Stabilisation der Emissionswerte für Kohlendioxid sein;
- Transfer der für die Klimaerhaltung notwendigen Technologien an die Entwicklungsländer (51).

Eine besondere Bedeutung wird das UNEP in den nächsten Jahren durch seine Rolle im Zusammenhang mit der für 1992 in Brasilien geplanten UN-Konferenz über Umwelt und Entwicklung (United Nations Conference on Environment and Development) bekommen. Gemäß der entsprechenden Resolution der UN-Vollversammlung soll insbesondere UNEP sich bei der Vorbereitung der Konferenz engagieren (52). Hervorzuheben ist in diesem Zusammenhang, daß der erste Exekutivdirektor des UNEP, der Kanadier Maurice Strong, als Exekutivdirektor der Konferenz benannt wurde.

## 5.2 Weltorganisation für Meteorologie (WMO)

Die Weltorganisation für Meteorologie (World Meteorological Organization, WMO) geht auf die Internationale Meteorologische Organisation (IMO) – eine Nicht-Regierungsorganisation, die bereits seit 1878 existierte – zurück. Die IMO wurde nach dem 2. Weltkrieg in eine Internationale Regierungsorganisation, die WMO, umgebildet. Als Sonderorganisation der Vereinten Nationen unterhält die WMO enge Beziehungen zu anderen Mitgliedern der UN-Familie, insbesondere zur FAO, zur UNESCO und zu UNEP. Sitz der Organisation ist Genf, sie hat 152 Mitglieder (Stand 1987).

Gemäß Artikel 2 des WMO-Abkommens hat die Organisation die Aufgabe, die weltweite Zusammenarbeit bei der Wetterbeobachtung sowie die hydrologische und geophysikalische Beobachtung zu fördern. Weiterhin soll sie die Standardisierung der nationalen Regelungen vorantreiben und entsprechende Forschungsaufgaben wahrnehmen. Hauptorgan der WMO ist der Meteorologische Weltkongreß, der alle vier Jahre tagt und die grundsätzliche Politik der Organisation bestimmt.

Besondere Aufmerksamkeit widmet die WMO dem Klima als eigenständigem Umweltmedium. Die Organisation berief 1979 die bereits erwähnte 1. Weltkli-

makonferenz in Genf mit dem Thema „Klimaveränderungen durch CO<sub>2</sub>-Emission“ ein, aus der auch das Welt-Klima-Programm zur Untersuchung der Umwelteinflüsse auf das Klima und zur Verminderung der Abhängigkeiten resultierte. Dieses Programm, an dem auch UNEP beteiligt ist, wird durch die Mitgliedstaaten der WMO finanziert (53).

Zur Zeit bereitet die WMO gemeinsam mit UNEP, dem ICSU und der UNESCO die 2. Weltklimakonferenz (Second World Climate Conference, SWCC) vor, die vom 12. bis 21. November in Genf stattfinden soll.

### 5.3 Intergouvernementaler Ausschuß über Klimaänderungen (IPCC)

Im November 1988 wurde der Intergouvernementale Ausschuß über Klimaänderungen (Intergovernmental Panel on Climate Change, IPCC) gegründet. Aufgabe diese von WMO und UNEP eingesetzten Gremiums ist eine Zusammenstellung und Bewertung der wissenschaftlichen Erkenntnisse über die Klimaänderungen sowie die Formulierung realistischer und international akzeptierter Strategien zur Bewältigung des zusätzlichen Treibhauseffektes. In diesem Gremium arbeiten Teilnehmer aus über 40 Nationen und zahlreiche Internationaler Organisationen mit. Einen ersten Bericht soll der Ausschuß zur 2. Weltklimakonferenz vorlegen.

Die erste Sitzung des Ausschusses fand im November 1988 statt. Bei dieser Gelegenheit wurde die Einrichtung von drei Arbeitsgruppen beschlossen. Arbeitsgruppe I erhielt den Auftrag, die verfügbaren wissenschaftlichen Erkenntnisse zum zusätzlichen Treibhauseffekt zu bewerten. Arbeitsgruppe II bewertet die ökologischen und sozioökonomischen Wirkungen des zusätzlichen Treibhauseffektes. Die Arbeitsgruppe III (Response Strategies Working Group, RSWG) beschäftigt sich mit der Ausarbeitung und Bewertung verschiedener Möglichkeiten und Strategien, mit denen auf die Veränderung der Erdatmosphäre reagiert werden kann. Als Vorarbeiten zu dem bis zur 2. Weltklimakonferenz im Herbst des Jahres 1990 zu erstellenden Entwurf einer Klimakonvention sollen innerhalb der RSWG zu folgenden Themen Papiere erarbeitet werden:

- rechtliche Maßnahmen und Vorgehensweisen,
- Technologietransfer und entwicklungspolitische Maßnahmen,
- finanzielle Maßnahmen,
- Maßnahmen im Bildungsbereich und Öffentlichkeitsarbeit,
- ökonomische Maßnahmen.

Nach dem Selbstverständnis der Arbeitsgruppe III ist dies eine reine Entwurfsarbeit. Keinesfalls soll es im Rahmen dieser Arbeitsgruppe schon zu Verhandlungen über die Ausgestaltung einer Klimakonvention kommen. Als Ergebnis dieser Arbeitsgruppe soll bis Herbst 1990 ein Entwurf für die angestrebte Konvention formuliert werden.

Die Verhandlungen in der Arbeitsgruppe III des IPCC haben gezeigt, daß weiterhin unterschiedliche Vorstellungen über die Dringlichkeit und Priorität eines entschlossenen Vorgehens mit dem Ziel, den Treibhauseffekt einzudämmen, bestehen. Das notwendige Tempo von Maßnahmen war auf der bisher letzten Sitzung der Arbeitsgruppe vom 5. bis 9. Juni 1990 umstritten.

Im Entwurf eines Abschlußberichts dieses Gremiums wurde zunächst ein frühzeitiges Vorgehen (early action) vorgeschlagen. Auf Antrag Saudi-Arabiens, das dabei aber weite Unterstützung erfuhr – unter anderem von der UdSSR, Japan, China und den USA – wurde dies zu einem rechtzeitigen Vorgehen (timely action) verändert (54). Wie bedeutsam diese Änderung für die Vertreter der verschiedenen Positionen ist, läßt sich daran ablesen, daß ein gesamter Nachmittag der Arbeitsgruppensitzung um die Veränderung dieses Wortes ging (55).

Im gleichen Geiste wurde eine Passage des Berichtsentwurfs verändert, deren ursprünglicher Wortlaut hieß:

„A very broad consensus has therefore emerged in the RSWG, confirmed notably at the 44th United Nations General Assembly, on the need for early completion of a framework convention on climate change, laying down, as a minimum, general principles and obligations.“

Die im Verlauf der Diskussion geänderte Fassung lautet nunmehr: „A consensus emerged at the 44th session of the UN General Assembly on the need to prepare as a matter of urgency a framework convention on climate change,“ (56).

Abschließend wird im Bericht der Arbeitsgruppe III ausgeführt, daß Verhandlungen über eine Rahmenkonvention so schnell wie möglich nach Vorlage des Zwischenberichts des IPCC aufgenommen werden sollen. Diese konsensual gefaßte Formulierung ist nach allen Seiten interpretierbar, da sie in bezug auf die Aufnahme oder den Abschluß der Verhandlungen keine Jahreszahl vorgibt. Die Position jener Staaten, die für einen frühzeitigen Abschluß der Verhandlungen bis spätestens zur UN-Konferenz über Umwelt und Entwicklung eintreten, wird nur referiert (57). Einige Delegationen scheinen ernsthaft in Erwägung zu ziehen, verschiedene konkrete Verpflichtungen in die Rahmenkonvention selbst aufzunehmen.

Zunehmende Sorgen über die Kosten eines entschlossenen Vorgehens gegen den zusätzlichen Treibhauseffekt und seine Folgen scheinen die USA, viele Staaten Osteuropas und der Dritten Welt, insbesondere aber die ölfördernden Länder, zu veranlassen, unverzügliche Maßnahmen zum Schutze der Erdatmosphäre zugunsten einer abwartenden Haltung zurückzustellen.

Eine unverzügliche und aktive Aufnahme von Verhandlungen über die Protokolle mit dem Ziel einer baldigen Unterzeichnung ist wahrscheinlich zur Zeit nur von der EG und ihren Mitgliedstaaten, den skandinavischen Staaten, Österreich, der Schweiz, Kanada, Australien und Neuseeland zu erwarten. Diese Liste ist eventuell um einige besonders betroffene Entwicklungsländer, wie zum Beispiel die Malediven, zu erweitern.

#### 5.4 Internationaler Rat wissenschaftlicher Vereinigungen (ICSU)

Der Internationale Rat wissenschaftlicher Vereinigungen (International Council of Scientific Unions, ICSU) mit Sitz in Paris ist eine renommierte Internationale Nicht-Regierungsorganisation im umweltwissenschaftlichen Sektor. Ihm gehören die großen internationalen naturwissenschaftlichen Wissenschaftsverbände (zum Beispiel für reine und angewandte Physik, für reine und angewandte Chemie, für Geodäsie und Geophysik) an. Die ICSU wirkte in der Vergangenheit unter anderem an der Vorbereitung und Ausarbeitung der UN-Konferenz in Stockholm über die Umwelt des Menschen im Jahre 1972 mit und hatte auch am Umwelt-Aktionsplan der Konferenz einen wichtigen Anteil. Zusammen mit der WMO gründete die ICSU nach der ersten Weltklimakonferenz von Genf im Jahre 1979 einen gemeinsamen wissenschaftlichen Ausschuß zur Vorbereitung und Koordination des Welt-Klima-Programms (WCP). Im Rahmen dieses Programms betreut die ICSU insbesondere das Welt-Klima-Forschungsprogramm (WCRP). Weiterhin arbeitet die ICSU mit der WMO und auch dem UNEP in der Beratergruppe Treibhausgase (Advisory Group on Greenhouse Gases, AGGG) zusammen, die von WMO, UNEP und ICSU als Reaktion auf die Konferenz von Villach im Jahre 1985 gegründet wurde. Diese Beratergruppe soll die WMO, UNEP und ICSU in Fragen des zusätzlichen Treibhauseffektes beraten und hat zu diesem Zweck die Einrichtung von drei Arbeitsgruppen vorgeschlagen, die einen Teil der erforderlichen strategiebezogenen Forschungsarbeiten durchführen soll. Dieser Vorschlag ist mit Gründung des IPCC berücksichtigt worden.

#### 6. Bewertung

Aus der Betrachtung der bisherigen Politik zur Eindämmung des zusätzlichen Treibhauseffekts kann abgeleitet werden, daß sich zum gegenwärtigen Zeitpunkt die überwiegende Anzahl der Staaten abwartend verhält und noch keine wesentlichen Vorentscheidungen über die einzuschlagende Strategie der Staatengemeinschaft gefallen sind.

Zwar hat sich die Einsicht in die Notwendigkeit eines international abgestimmten Vorgehens erhöht, doch immer noch vertreten wichtige Mitglieder der internationalen Staatengemeinschaft die Auffassung, es seien zunächst weitere umfangreiche Forschungsprogramme zur Untersuchung von Ursachen- und Wirkungszusammenhängen erforderlich, bevor kostenintensive und tiefgreifende Schutzmaßnahmen ergriffen werden sollten. Andere Länder – darunter die Bundesrepublik Deutschland – drängen hingegen auf sofortiges Handeln.

Gelingt es nicht, im Vorfeld der 1992 in Brasilien stattfindenden UN-Konferenz über Umwelt und Entwicklung alle wichtigen Staaten und Staatengruppen auf die letztgenannte Position festzulegen, so muß mit einer weiteren Verschleppung von dringend notwendigen Maßnahmen gerechnet werden.

Immerhin ist unumstritten, daß ein internationales Vorgehen nur wirkungsvoll sein kann, wenn es darum geht, die klimarelevanten Spurengasemissionen aus dem Energiesektor entscheidend zu reduzieren und sich dies als erforderlich erweist. Einigkeit besteht auch darin, daß – falls erforderlich – eine internationale Konvention verabschiedet werden muß.

Es ist allerdings zu beachten, daß auch unter den Industrieländern erhebliche Unterschiede in der grundsätzlichen Einschätzung eines Vertragswerkes bestehen, das unter Umständen erhebliche Eingriffe in die nationale Souveränität nach sich zieht. Keine Einigkeit besteht unter den Industrieländern, ob in einer zukünftigen Konvention nur Empfehlungen oder aber bindende Verpflichtungen niedergelegt werden sollen. Vertreter der ersten Meinung sind Großbritannien, Japan und die USA. Dem zweiten Standpunkt neigen zum Beispiel Frankreich, die Niederlande und die skandinavischen Staaten zu. Diese Meinungsunterschiede führen dazu, daß alle wesentlichen Komponenten einer internationalen Strategie zur Reduktion energiebedingter klimarelevanter Spurengasemissionen, also das anzustrebende globale Reduktionsziel, die einzugehenden Reduktionspflichten und die Verteilung von Reduktionspflichten, noch völlig ungeklärt sind. Als weiterer strittiger Punkt im Zusammenhang mit der institutionellen Ausgestaltung ist anzusehen, ob eine künftige Konvention durch eine bestehende Internationale Organisation (Standpunkt von Großbritannien, Japan, USA) abgewickelt werden kann, oder ob dazu neue Institutionen beziehungsweise „institutionelle Befugnisstrukturen“ geschaffen werden müssen. Letztere Position wurde von den Unterzeichnern der Deklaration von Den Haag propagiert.

Im Prinzip unumstritten ist unter den Industrieländern die Notwendigkeit, die Entwicklungsländer finanziell und durch Technologietransfer zu unterstützen. Die meisten von ihnen haben öffentlich ihre Bereitschaft erklärt, substantielle Transfers und Hilfen an die Entwicklungsländer zu leisten, um ihnen die Erfüllung etwaiger Verpflichtungen einer Konvention zu ermöglichen. Die Art und Weise, wie diese Unterstützung geleistet werden soll, ist aber zur Zeit noch völlig ungeklärt. Einige Länder bevorzugen bilaterale Hilfen. Andere Länder ziehen eine multilaterale Hilfe über einen „Klimafonds“ in Betracht. Hier müßte zunächst eine Abgrenzung zwischen Gebern und Nehmern gefunden werden. Außerdem bestehen ganz unterschiedliche Vorstellungen darüber, aus welchen Einnahmen ein solcher Fonds zu speisen ist und wer über die Verwendung zu befinden hat.

#### 7. Literaturverzeichnis

- (1) Die Abbildung basiert auf den in Tabelle 1 genannten Daten, die vom Umweltbundesamt auf der Basis der folgenden Quellen aufbereitet wurden: Energy Statistics Yearbook, United Nations, New York 1986 und Energy Balances, OECD 1984/1986.
- (2) Die in Tabelle 1 genannten Angaben wurden vom Umweltbundesamt auf der Basis der folgenden Quellen aufbereitet: Energy Statistics Yearbook, United Nations, New York



- 1986 und Energy Balances, OECD 1984/1986. Die Angaben beinhalten den nichtenergetischen Energieverbrauch nicht, dem somit keine Emissionen zugeordnet werden. Die Werte erfassen ferner nicht die energiebedingten Emissionen der weiteren klimarelevanten Spurengase, die, in CO<sub>2</sub>-Äquivalenzen umgerechnet, zu den CO<sub>2</sub>-Emissionen addiert werden müßten, um die gesamten Emissionen aus dem Energiebereich, nach Ländern gegliedert, zu erhalten. Die internationalen und nationalen Statistiken differieren, so daß eine Ungenauigkeit für den weltweiten Wert in der Größenordnung von +/-10 Prozent, für einzelne Länder möglicherweise in noch größerem Umfang, anzunehmen ist. Dies erklärt auch die zum Teil abweichenden Angaben für einzelne Länder an anderen Stellen dieses Abschnitts.
- (3) Vgl. Flohn, Hermann: Treibhauseffekt der Atmosphäre: Neue Fakten und Perspektiven, in: EK-Drucksache 11/125, S. 44
- (4) Vgl. Flohn, Hermann: Welt-Klima-Konferenz: Wechselwirkungen von Klima und Wirtschaft – Klima-Anomalien – Rolle des Kohlendioxids – Energie- und Umweltprobleme, in: Vereinte Nationen 3/1979, S. 108
- (5) Vgl. Wilson, C.A. und J.F.B. Mitchell: A doubled CO<sub>2</sub> climate sensitivity experiment with a global climate model including a simple ocean, J. Geophys. Res. Band 92, 1987
- (6) Vgl. Studienprogramm der EK, hier: E 11, S. 3 – 5. Vgl. zum Inhalt des Studienprogramms der EK im einzelnen: Abschnitt E, 6. Kapitel
- (7) Vgl. ebenda, S. 8f
- (8) Vgl. Beijer Institute: Developing policies for responding to climate change, Stockholm 1988, S. 36-41
- (9) Vgl. Weltkommission für Umwelt und Entwicklung: Unsere gemeinsame Zukunft, Greven 1987, S. 177
- (10) Vgl. ebenda, S. 315 f
- (11) Vgl. Wirtschaftserklärung der Staats- und Regierungschefs aus der Bundesrepublik Deutschland, Frankreich, Großbritannien, Italien, Japan, Kanada und den Vereinigten Staaten sowie von Vertretern der Europäischen Gemeinschaft zum Wirtschaftsgipfel in Toronto, in: Europaarchiv 14/1988, D 386
- (12) Vgl. Studienprogramm der EK, hier: E 11, S.14
- (13) Vgl. ebenda, S. 15
- (14) Vgl. Protection of the Atmosphere: International Meeting of Legal and Policy Experts: Statement of the Meeting of Legal and Policy Experts, Ottawa, den 22. Februar 1989
- (15) Vgl. Presse und Informationsamt der Bundesregierung (Hrsg.): Erklärung von den Haag, in: dasselbe: Bulletin Nr. 27, Bonn, den 15. März 1989, S. 242
- (16) Vgl. Wirtschaftserklärung von Paris, in: Presse- und Informationsamt der Bundesregierung (Hrsg.) (Bulletin Nr. 76), Bonn, den 19. Juli 1989, S. 667
- (17) Vgl. ebenda, S. 668
- (18) Vgl. ebenda, S. 669
- (19) Vgl. International Conference on „Global Warming And Climate Change: Perspectives From Developing Countries“: Conference Statement, Neu Dehli, den 21. – 23. Februar 1989, S. 8, 11f
- (20) Vgl. Czakainski, Martin und Hans Michaelis: 14. Weltenergiekonferenz – Tendenzen, Ergebnisse, Bewertungen, in: Energiewirtschaftliche Tagesfragen 11/1989, S. 694 und 698f.
- (21) Vgl. The Noordwijk Declaration On Atmosphäre Pollution and Climatic Change, Noordwijk 1989
- (22) Vgl. Bergen Ministerial Declaration on Sustainable Development in the ECE-Region vom 16. Mai 1990, S. 9
- (23) Vgl. International Conference on Energy and Climate and Development: Policy Issues and Technological Options: Highlights of Deliberations, Saarbrücken, den 28. – 31. Mai 1990
- (24) Vgl. Wirtschaftserklärung von Houston, in: Presse- und Informationsamt der Bundesregierung (Hrsg.): Wirtschaftsgipfel Houston-Treffen der Staats- und Regierungschefs vom 9. bis 11. Juli 1990 (Bulletin Nr. 91, Bonn, den 13. Juli 1990, S. 788
- (25) Die Abbildung basiert auf den in Tabelle 1 genannten Daten der EG-Mitgliedstaaten, die vom Umweltbundesamt auf der Basis der folgenden Quellen aufbereitet wurden: Energy Statistics Yearbook, United Nations, New York 1986 und Energy Balances, OECD 1984/1986.
- (26) Vgl. EG-Kommission: Der Treibhauseffekt und die Gemeinschaft – Mitteilung an den Rat, Kom (88) 656, Brüssel, den 16.11.1988, S. 57f.
- (27) Vgl. Studienprogramm der Enquete-Kommission, hier: E.2a, S. 13
- (28) Vgl. EG-Kommission: Der Treibhauseffekt und die Gemeinschaft – Mitteilung an den Rat, Kom (88) 656, Brüssel, den 16.11.1988, S. 57f.
- (29) Vgl. ebenda, S.18
- (30) Vgl. Studienprogramm der Enquete-Kommission, hier: E 2a, S. 17f.
- (31) Vgl. BR-Drucksache 162/90: Mitteilung der Kommission der Europäischen Gemeinschaften an den Rat über „Energie und Umwelt“, Bonn, den 28.02.1990
- (32) Vgl. Presse- und Informationsamt der Bundesregierung (Hrsg.): Europäischer Rat in Dublin – Tagung der Staats- und Regierungschefs der EG am 25. und 26. Juni 1990 (Bulletin Nr. 84), Bonn, den 30. Juni 1990, S. 726
- (33) Vgl. Sir Crispin Tickell: Global Climate Change. Rede vor dem Economic and Social Council der Vereinten Nationen am 8. Mai 1989, S. 6
- (34) Vgl. ebenda, S.7f
- (35) Vgl. Thatcher, Margaret: Klima und Umwelt, in: Britische Dokumentation D 13/90 (Hrsg. Britische Botschaft ), Bonn 1990, S. 4 ff
- (36) Vgl. Bromley, D.Allen: Präventivmaßnahmen gegen Treibhauseffekt. Rede vor dem National Press Club am 11. April 1990
- (37) Vgl. Bergen Ministerial Declaration on Sustainable Development in the ECE-Region vom 16. Mai 1990, S. 9
- (38) Vgl. ebenda, S. 3, 6
- (39) Vgl. Studienprogramm der EK, hier: Studienkomplex B, S. 102f
- (40) Vgl. ebenda, S. 78
- (41) Vgl. Mao Yushi: What are the implications and challenges for LDC's? – A Chinese Perspective. Vortrag vor der „Fourth International Energy Conference“ des Royal Institute of International Affairs am 4. Dezember 1989, handschriftliches Manuskript, London 1989, S. 2
- (42) Vgl. Studienprogramm der EK, hier: Studienkomplex B, S. 79
- (43) Vgl. Mao Yushi 1989, S. 6
- (44) Vgl. Studienprogramm der EK, hier: Studienkomplex B, S. 83f
- (45) Vgl. Wirtschaftserklärung von Houston, in: Presse- und Informationsamt der Bundesregierung (Hrsg.): Wirtschaftsgipfel Houston – Treffen der Staats- und Regierungschefs vom 9. bis 11. Juli 1990, (Bulletin Nr. 91), Bonn, den 13. Juli 1990, S. 789

- (46) Vgl. BMU: Umweltpolitik-Bericht der Bundesregierung an den Deutschen Bundestag über die Erfüllung international eingegangener Verpflichtungen zur Reduzierung der Luftverunreinigung, Bonn 1990, S. 3
- (47) Nach Usher, Peter (UNEP): The International Response To Climate Change, Konferenz-Unterlage für den Weltkongreß „Klima und Entwicklung“ in Hamburg vom 7.-10.11.1988
- (48) Vgl. zur Organisation und zu den Aktivitäten des UNEP: Kilian 1987
- (49) Vgl. UN-Resolution 2997 (XXVII) Institutionelle und finanzielle Maßnahmen für die internationale Zusammenarbeit auf dem Gebiet der Umwelt vom 15. Dezember 1972, in: Kilian, Michael: Umweltschutz durch internationale Organisationen, Berlin 1987, S. 436f.
- (50) Vgl. UN-General Assembly: Resolution 43/53 vom 6. Dezember 1988
- (51) Vgl. UNEP: Governing Council-Draft Devision „Global Climate Change“ (UNEP/GC.15/L.22/Add.3), Nairobi, 24. May 1989
- (52) Vgl. UN-General Assembly (Second Committee: Development and International Economic Co-Operation: Environment): United Nations Conference on Environment and Development 1992
- (53) Vgl. Kilian, Michael: Umweltschutz durch internationale Organisationen — die Antwort des Völkerrechts auf die Krise der Umwelt?, Berlin 1987, S. 202 — 205
- (54) Vgl. IPCC: Policymakers summary of the Formulation of the Response Strategies (Report prepared for IPCC by Working Group III, June 1990, S. 41
- (55) Vgl. Financial Times (No. 31,168) vom 8. Juni 1990, S. 1

- (56) Vgl. IPCC: Policymakers summary of the Formulation of the Response Strategies (Report prepared for IPCC by Working Group III, June 1990, S. 41
- (57) Vgl. IPCC: Policymakers summary of the Formulation of the Response Strategies (Report prepared for IPCC by Working Group III, June 1990, S. 42

## 8. Tabellenverzeichnis

Tab. 1: Energiebedingte Kohlendioxid (CO<sub>2</sub>)-Emissionen in Millionen Tonnen CO<sub>2</sub>, Anteile an den weltweiten CO<sub>2</sub>-Emissionen und CO<sub>2</sub>-Emissionen pro Kopf sowie Beiträge der fossilen Energieträger Kohle, Erdöl und Gas zu den gesamten CO<sub>2</sub>-Emissionen für Staaten und abhängige Gebiete (Basisjahr: 1986)

Tab. 2: Internationale Konferenzen und Vereinbarungen zur Eindämmung des zusätzlichen Treibhauseffektes seit 1979 (Auswahl)

## 9. Abbildungsverzeichnis

Abb. 1: Prozentualer Anteil einzelner Staaten an den weltweiten energiebedingten Kohlendioxidemissionen im Jahr 1986

Abb. 2: Energiebedingte CO<sub>2</sub>-Emissionen der EG-Mitgliedstaaten im Jahr 1986

Abb. 3: Internationale Zusammenarbeit im Rahmen des Welt-Klima-Programms zur Erforschung der Auswirkungen des zusätzlichen Treibhauseffektes und der Entwicklung von politischen Strategien zur Eindämmung dieser globalen Bedrohung.

## 2. KAPITEL

### Empfehlungen zur Ausgestaltung einer Internationalen Konvention über Klima und Energie und möglicher Zusatzvereinbarungen

Die Ursachen der Erwärmung der Erdatmosphäre und der Bedrohung der Ozonschicht sowie die Quellen der verantwortlichen Spurengase sind im Grundsatz weltweit verteilt. Wirkungen dieser Veränderungen des Klimas werden ebenfalls weltweit zu spüren sein. Deshalb gehen alle Überlegungen über Maßnahmen zur Eindämmung des zusätzlichen Treibhauseffektes davon aus, daß allein eine internationale Kooperation in Form verbindlicher völkerrechtlicher Übereinkommen einen ausreichenden Schutz zu gewährleisten vermag.

Über deren Regelungsinhalt und die Reichweite der zu treffenden Vereinbarungen bestehen allerdings, wie die bisherigen Vorschläge zeigen, erhebliche Meinungsverschiedenheiten. Symptomatisch hierfür ist die Vielzahl von Konventionstiteln. Vorgeschlagen wurden unter anderem

- eine Internationale Konvention zum Schutz der Erdatmosphäre (Vorschlag Kanadas auf der Toronto-Konferenz);

- eine Klima-Konvention (Vorschlag der USA auf der Toronto-Konferenz);
- eine Konvention zum Schutz vor weltweiten Klimaänderungen (daran arbeitet zur Zeit IPCC).

Diese Bezeichnungen entsprechen entweder nicht dem vorgesehenen Regelungsinhalt oder sind — wie der kanadische Vorschlag — zur Zeit noch nicht realisierbar. Zwar hat auch die Enquete-Kommission bereits in ihrem ersten Bericht eine Internationale Konvention zum Schutz der Erdatmosphäre gefordert, die bis 1992 realisiert werden sollte, doch ist dies nicht zu erreichen, da bisher nicht die erforderlichen sektoralen Regelungen vorliegen. In ihrem ersten Bericht hat die Kommission deutlich gemacht, daß zunächst die konkrete Ausgestaltung und die Durchführung von internationalen und nationalen Maßnahmen zur Verringerung der Emissionen aus bestimmten Bereichen (FCKW, Energie, Wald- und Forstwirtschaft, Landwirtschaft und Welternährung) in Form einzelner, den Sachgebieten zuzuordnender Einzelprotokolle oder

Einzelübereinkommen festgelegt werden müsse. Im Bereich der Energie geht es dabei um die Reduktion der energiebedingten klimarelevanten Spurengasemissionen.

Der amerikanische Vorschlag und auch der vom IPCC erörterte Konventionentwurf verfolgt ebenfalls diese Zielrichtung unter Einschluß von Schutzmaßnahmen für die Wälder. Im jeweiligen Konventionstitel wird durch die Verwendung des Begriffs „Klima“ beziehungsweise „klimatische Veränderungen“ allerdings der Eindruck erweckt, als würden diese Konventionentwürfe alle Ursachen von Klimaveränderungen umfassen. Dies ist offensichtlich nicht der Fall, da zum Beispiel die FCKW nicht erfaßt sind und gleichzeitig bis zur Jahrtausendwende Maßnahmen in diesem Bereich den mit Abstand stärksten Beitrag zur Reduktion der klimarelevanten Spurengase erbringen, so daß die hier getroffenen Vereinbarungen (Wiener Übereinkommen, Montrealer Protokoll, 2. Vertragsstaaten-Konferenz in London) weit eher als alle anderen möglichen und zur Zeit diskutierten Vereinbarungen die Bezeichnung „Klima-Konvention“ oder „Konvention zum Schutz vor weltweiten Klimaänderungen“ verdient hätten.

Die gegenwärtig auf internationaler Ebene dominierende Strategie, die Wälder in ein Übereinkommen zur Reduktion energiebedingter klimarelevanter Spurengasemissionen einzubeziehen, wäre aber nur unter der Prämisse sachgerecht, daß alle klimarelevanten Emissionen in einem Übereinkommen geregelt würden. Nur unter dieser Voraussetzung könnte darüber hinweggesehen werden, daß die völlig unterschiedliche Ausgangslage in den Bereichen „Energie“ und „Wald/Forstwirtschaft“ ohne vorherige sektorale Aufarbeitung in Einzelübereinkommen in einem übergreifenden Übereinkommen geregelt werden. Dieser erste Schritt fehlt allerdings bisher völlig.

Aus diesen Gründen empfiehlt die Enquete-Kommission, zunächst ein internationales Übereinkommen zur Reduktion energiebedingter klimarelevanter Spurengasemissionen auszuhandeln. Um den Bezug zum tatsächlichen Regelungsgehalt herzustellen und damit eine korrekte Bezeichnung der Konvention zu erhalten, andererseits aber dem Bestreben Rechnung zu tragen, einem solchen Vertragsvermerk einen kurzen und prägnanten Titel mit Hinweis auf die Klimaproblematik zu geben, schlägt die Enquete-Kommission ein internationales Übereinkommen mit dem Titel „Internationale Konvention über Klima und Energie“ vor.

### **1. Anforderungen an eine Internationale Konvention über Klima und Energie**

Um weltweit eine möglichst große Entlastung der Erdatmosphäre zu bewirken, sollten die Struktur und die Elemente des Vertragswerkes in einer Weise ausgestaltet werden, daß

- möglichst viele Staaten – darunter vor allem die Entwicklungsländer – dem Vertragswerk beitreten und

- mit diesen Vertragsstaaten ein möglichst großer Anteil an den energiebedingten klimarelevanten Emissionen, die den zusätzlichen Treibhauseffekt zu 50 Prozent mitverursachen, abgedeckt wird.

Folgende Grundsätze müssen dabei beachtet werden:

Die Wahl der Instrumente zur Umsetzung konkreter Reduzierungsverpflichtungen sollte den einzelnen Vertragsparteien überlassen bleiben. Der Bindungscharakter der Konventionsverpflichtungen sollte daher nicht über den der Richtlinie im EWG-Vertrag hinausgehen, die den Mitgliedstaaten die Mittel zur Durchführung überläßt, die Ziele indes vorgibt (1).

Im Interesse der Wirksamkeit von Vereinbarungen muß der Gesichtspunkt der Akzeptabilität für die Länder, die großen Anteil an den energiebedingten klimarelevanten Spurengasemissionen und somit an den durch eine Reduktionspolitik entstehenden wirtschaftlichen Lasten haben, beachtet werden.

Internationale Abkommen sollten daher schon in der Entwurfsphase so ausgelegt und formuliert werden, daß für die Bereitschaft einzelner Staaten und Staatengruppen, mehr und früher energiebedingte klimarelevante Spurengasemissionen zu reduzieren, Anreize geschaffen werden. So kann etwa eine Vortermiierung des Bezugsjahres den Ländern, die in nächster Zukunft geeignete Maßnahmen zur Reduktion in diesem Bereich durchführen oder bereits eingeleitet haben, zusichern, daß sie sich dadurch nicht in eine schlechtere Ausgangslage bringen.

Eine internationale Vereinbarung sollte weiterhin so gestaltet sein, daß nationale und internationale Maßnahmen, die dadurch initiiert werden, keine neuen ökologischen und sozialen Schäden und Risiken entstehen lassen, sondern so weit wie möglich gleichzeitig andere negativen Folgen und Risiken reduziert oder minimiert werden.

Weiterhin sollte beachtet werden, daß sich die Quellen der energiebedingten klimarelevanten Spurengasemissionen in unterschiedlichen Ländern mit ganz anders gearteten technologischen, organisatorischen, sozialen, politischen und auch wirtschaftlichen Voraussetzungen zur Durchführung von Konventions- und Protokollverpflichtungen befinden.

Den zusätzlichen Treibhauseffekt und seine Gefahren zur Kenntnis zu nehmen, wird außerdem in verschiedenen Ländern und ihren Bevölkerungen unterschiedliche Zeit beanspruchen. Dies könnte zusammen mit Unterschieden im Einkommensniveau und in der Wirtschaftskraft einzelner Länder zu einer unterschiedlichen Prioritätensetzung führen, die die Bewertung der Folgen des zusätzlichen Treibhauseffektes im nächsten Jahrhundert für den jetzigen Zeitpunkt beeinflusst. Der langfristige Charakter der Schäden in Verbindung mit einer jahrzehntelangen Vorlaufzeit könnte viele Entwicklungsländer dazu bewegen, diese Schäden trotz ihres potentiell katastrophalen Umfangs niedriger einzuschätzen als Umweltprobleme, die bereits heute vorhanden, aber noch ungelöst sind, wie die sanitäre Versorgung der Städte, Bodenerosion oder Gewässerversalzung. Eine internationale Konvention wird auf diese unterschiedlichen Verhältnisse Rücksicht nehmen müssen.

In der Absicht, die negativen ökonomischen Auswirkungen von sich fernzuhalten, haben die Entwicklungsländer in der Vergangenheit in internationalen Umweltschutzkonferenzen durchaus mitgearbeitet. Allerdings haben die meisten internationalen Umweltschutzabkommen kaum zu Reduktionspflichten und damit zu Belastungen für diese Ländergruppe geführt. Das Montrealer Protokoll und die Londoner Vereinbarungen stellen einen Anfang dar (2). In einer Konvention, die der weiteren Eindämmung des zusätzlichen Treibhauseffekts dient, kommen jedoch voraussichtlich auch auf die Entwicklungsländer erheblich größere Probleme zu. Die Frage einer Reduktion insbesondere von CO<sub>2</sub>-Emissionen berührt direkt die Entwicklungsbestrebungen vieler Entwicklungsländer. Würde man diesen Ländern im Rahmen eines Übereinkommens Reduktionspflichten auferlegen wollen, so wäre dies gleichbedeutend mit der Aufforderung, auf Entwicklung zu verzichten. Ein solches Vorgehen würde die Konvention schon im Verhandlungsstadium scheitern lassen.

Gerade die Aufgabe einer Eindämmung des zusätzlichen Treibhauseffektes durch die Reduktion energiebedingter klimarelevanter Spurengasemissionen wird eine Herausforderung für die internationalen Beziehungen darstellen, in deren Mittelpunkt eine faire und konstruktive Zusammenarbeit zwischen Industrie- und Entwicklungsländern stehen muß. Diese Zusammenarbeit reicht wegen der engen Verknüpfung einer Politik der Reduzierung von Treibhausgasemissionen mit allgemeinen Fragen der wirtschaftlichen Entwicklung, insbesondere der erforderlichen weltweiten Absenkung des Energieverbrauchs, über das herkömmliche Handlungsfeld der internationalen Umweltpolitik weit hinaus.

Gegenwärtig sehen die Länder der Dritten Welt die Weltwirtschaftsbeziehungen, Defizite im Stand ihrer technischen Entwicklung und ihre wirtschaftliche Armut als Hauptursachen für die Umweltkrise an. Solange die Industriestaaten nicht zeigen, daß sie es bei sich zu Hause mit einem Wandel zu einer umweltverträglichen wirtschaftlichen Entwicklung ernst meinen, werden Verhaltensempfehlungen etwa zum Schutz der Tropenwälder oft seitens des Südens als „spezifische Variante des Neokolonialismus“ interpretiert. Die Enquete-Kommission hat daher in ihrem 2. Bericht zum Schutz der tropischen Wälder betont, daß die Industrienationen bei Aufnahme der Verhandlungen über eine Tropenwaldkonvention auf der Basis eines dazu parallel angestrebten internationalen Übereinkommens ihrerseits umgehend Maßnahmen einleiten müssen, die geeignet sind, von ihnen ausgehende globale Umweltgefährdungen soweit wie möglich zu reduzieren. Dies betrifft vor allem die drastische Verminderung der energiebedingten klimarelevanten Spurengasemissionen.

Die Zustimmung der Entwicklungsländer zu einem internationalen Übereinkommen dürfte daher zum einen von einer entsprechenden Zusage der Industrieländer, die sowohl zum jetzigen Zeitpunkt als auch historisch gesehen den weitaus größten Teil der (akkumulierten) Emissionen von Treibhausgasen verursachen beziehungsweise verursacht haben, abhängig sein, den Hauptbeitrag der Reduktionspflichten zu

leisten. Zum anderen werden die Entwicklungsländer nur dann entsprechende Vereinbarungen mittragen, wenn hierdurch ihre Entwicklungschancen nicht beeinträchtigt werden. Es ist daher notwendig, den Entwicklungsländern eine begrenzte Ausbauoption einzuräumen, die allerdings eine Energienutzung voraussetzt, die zu erheblich geringeren Emissionen von energiebedingten klimarelevanten Spurengasen führt, als dies nach den bisherigen Ausbauplanungen und dem dafür geplanten Technikeinsatz im Energiebereich der Fall wäre. Dies ist notwendig, da ansonsten die Reduktionsanstrengungen der Industrieländer durch die wachsenden Emissionen aus den Entwicklungsländern in ihrer Wirkung aufgehoben werden. Um den Entwicklungsländern dennoch das Erreichen ihrer angestrebten Ziele zu ermöglichen, sollte die internationale Staatengemeinschaft dafür Sorge tragen, daß in den Entwicklungsländern beim Aufbau von Industrie-, Infrastruktur-, Gewerbe-, Dienstleistungs- und Wohneinrichtungen sowie bei Überprüfung des jetzigen Bestandes vor allem umwelt- und sozialverträgliche, energieeffiziente und energiesparende Technologien eingesetzt werden können.

## **2. Schlußfolgerungen für die Ausgestaltung und Struktur einer Internationalen Konvention über Klima und Energie**

Die wichtigste Aufgabe in der kommenden Phase der Verhandlungen über einen Konventionsentwurf wird sein, einen Kompromiß zu finden zwischen einer politisch und juristisch stark bindenden, handlungsorientierten Vereinbarung einerseits, die in einigen Staaten auf Bedenken oder sogar Ablehnung stoßen wird, und andererseits einer Vereinbarung, die in dem Bedürfnis, schnell zu ersten Schritten zu gelangen, relativ leicht durchzusetzen und für viele Staaten ohne Bedenken akzeptabel ist, inhaltlich aber kaum Fortschritte erzielt.

Aufgrund der sehr unterschiedlichen Interessen der Staaten ist nicht zu erwarten, daß von vornherein die bestmöglichen Maßnahmen ergriffen werden. Diese müssen vielmehr in einem kontinuierlichen Verhandlungsprozeß erarbeitet werden. Daraus ergibt sich die Notwendigkeit einer ständigen Überprüfung, Weiterentwicklung und Anpassung der getroffenen Vereinbarungen. Das gilt unabhängig davon, wie die Struktur des Vertrages beziehungsweise Vertragswerkes im Einzelnen aussehen wird (3). Eines der wichtigsten Gestaltungsprinzipien für das zu schaffende internationale Vertragswerk ist demnach eine nicht nur in organisatorischer Hinsicht evolutive Konzeption (4). Hierfür zeigt das Vorgehen bei der Reduktion der FCKW, das ausgehend von Wiener Übereinkommen über das Montrealer Protokoll bis zur 2. Vertragsstaaten-Konferenz in London im Rahmen vertraglich vorgesehener Überprüfungen zu erheblichen Verschärfungen geführt hat, den richtigen Weg, an dem sich auch das Vorgehen zur Reduktion der energiebedingten klimarelevanten Spurengasemissionen orientieren sollte.

Weiterhin sollte die internationale Konvention im Interesse ihrer baldigen Wirksamkeit nach Maßgabe

der allgemeinen und speziellen Pflichten vertikal, das heißt nach Rahmenvereinbarung, Protokollen und Anhängen, strukturiert werden. Es spricht eine Anzahl von Gründen dafür, daß konkrete Maßnahmen zur Reduktion der energiebedingten Spurengasemissionen erst in einem zweiten Schritt realisiert werden (5). Diese einzelnen Schritte sind inhaltlich und zeitlich in geeigneter Weise zu verknüpfen. Die Verknüpfung sollte schon in der Konvention angestrebt werden. Diese sollte die in einzelnen Vereinbarungen (Protokollen) zu regelnden Gegenstände benennen. Sie sollte außerdem eine Pflicht zur Aushandlung dieser Vereinbarungen enthalten, möglichst sogar Fristen hierfür nennen. Sollte alles dies in der Rahmenkonvention nicht möglich sein, müßte zumindest sichergestellt werden, daß bei Annahme der Rahmenkonvention Entscheidungen getroffen werden, die den Fortgang der Verhandlungen gewährleisten (6). Sollte es umgekehrt entgegen bisherigen Erfahrungen wegen wachsenden Problemdrucks und sich verstärkender weltweiter Diskussion der Thematik möglich sein, sehr schnell zu ersten konkreten Handlungsvereinbarungen zu gelangen, muß natürlich versucht werden, diese bereits parallel auszuhandeln.

### 3. Vorschlag für eine Internationale Konvention über Klima und Energie

Ausgehend von den bisherigen Aktivitäten zur Eindämmung des zusätzlichen Treibhauseffekts und unter Berücksichtigung von Erfahrungen, die bei der Aushandlung anderer Umweltabkommen gewonnen wurden, legt die Enquete-Kommission im folgenden einen Vertragsentwurf für eine Internationale Konvention über Klima und Energie vor. Sie stützt sich dabei im wesentlichen auf eine von ihr in Auftrag gegebene Studie (7) und den Abschlußbericht der Projektleiter des Studienkomplexes E, die in vieler Hinsicht auf Struktur und Wortlaut des Wiener Übereinkommens zum Schutz der Ozonschicht aufbauen.

Die Enquete-Kommission hat sich zu diesem detaillierten Vorgehen entschlossen, um schnellstmöglich eine Verhandlungsgrundlage für die Internationale Staatengemeinschaft zu schaffen, damit bereits vor der UN-Konferenz über Umwelt und Entwicklung in Brasilien im Jahr 1992 wesentliche Vorentscheidungen getroffen werden können.

#### Präambel

Die Vertragsparteien dieses Übereinkommens,

in der Erkenntnis, daß die Erdatmosphäre ein gemeinsames Gut aller Menschen ist;

besorgt über den starken Anstieg der Konzentration energiebedingter klimarelevanter Spurengase in der Atmosphäre;

im Bewußtsein der Gefahr, daß die Anreicherung von energiebedingten klimarelevanten Spurengasen in der Erdatmosphäre schwerwiegende Klimabeeinträchtigungen infolge des zusätzlichen Treibhausef-

fektes hervorrufen kann, deren Folgen für Vegetation und Tierleben, für die Bewohnbarkeit von ganzen Landstrichen und die Ernährung der Weltbevölkerung verheerend sein können und denen, auf lange Sicht betrachtet, niemand entkommen wird, falls nicht ausreichende Gegenmaßnahmen getroffen werden;

in der Überzeugung, daß deshalb aus Gründen der Vorsorge unverzüglich Maßnahmen und Strategien zum Schutz des Menschen und der Umwelt zum Wohl gegenwärtiger und zukünftiger Generationen ergriffen und entwickelt werden müssen;

im Bewußtsein der Notwendigkeit, weitere Forschungsarbeiten und systematische Beobachtungen durchzuführen, um die wissenschaftlichen Kenntnisse über die komplexen Zusammenhänge zwischen den verschiedenen Auswirkungen von Klimaveränderungen und über Handlungsstrategien weiter zu vertiefen;

im Bewußtsein, daß Maßnahmen zum Schutz der Erdatmosphäre vor Veränderungen infolge menschlicher Aktivitäten internationale Zusammenarbeit und internationales Handeln erfordern, das neue völkerrechtliche Grundsätze und neue, wirksamere Entscheidungs- und Durchsetzungsmechanismen verlangt;

unter Berücksichtigung der besonderen Verantwortung der Industrieländer, die maßgeblich die bisherige Anreicherung der klimarelevanten Spurengase in der Atmosphäre verursachen, und denen deshalb eine besondere Verantwortung für die Entwicklung und Initiierung geeigneter Maßnahmen und Strategien zukommt;

unter Berücksichtigung der Gegebenheiten und besonderen Bedürfnisse der Entwicklungsländer;

in der Erwägung, daß es angesichts des globalen Charakters der vom zusätzlichen Treibhauseffekt ausgehenden Umweltprobleme in Interesse aller Länder liegt, eine Politik zu verfolgen, die eine tragfähige und umweltgerechte Entwicklung zum Ziel hat;

eingedenk der Resolution 42/187 der UN-Generalversammlung über die Annahme des Berichts der Weltkommission für Umwelt und Entwicklung, insbesondere die festgestellte Notwendigkeit einer dauerhaften und tragfähigen Entwicklung;

ihre Bereitschaft bekräftigend, einen Beitrag zu einer dauerhaften Entwicklung zu leisten, deren Ziel darin besteht, die Nutzung der Ressourcen, die Struktur des nationalen Wirtschaftsprozesses und die internationale Wirtschaftsstrukturen mit der Begrenztheit der Ressourcen und der Belastbarkeit der Atmosphäre in Einklang zu bringen;

im Bewußtsein, daß durch die vorgeschlagenen Maßnahmen keine neuen ökologischen und sozialen Schäden und Risiken entstehen, sondern soweit wie möglich gleichzeitig andere negative Folgen und Risiken reduziert beziehungsweise minimiert werden sollen;

entschlossen, den Menschen und die Umwelt vor schädlichen Auswirkungen des zusätzlichen Treibhauseffektes zu schützen; sind wie folgt übereingekommen:

## Artikel I

### Begriffsbestimmungen

Im Sinne dieses Übereinkommens

1. bedeutet „Treibhauseffekt“ den von Gasen in der Atmosphäre hervorgerufenen Vorgang, der die kurzwellige Sonnenstrahlung nahezu ungehindert durch die Atmosphäre zur Erdoberfläche passieren läßt, die langwellige Wärmestrahlung der Erdoberfläche und der Atmosphäre hingegen stark absorbiert;
2. bedeutet „zusätzlicher Treibhauseffekt“ die Verstärkung des Treibhauseffektes infolge von Menschen verursachter klimarelevanter Spurengasemissionen;
3. bedeutet „klimarelevante energiebedingte Spurengasemissionen“ Emissionen von Spurengasen, die bei der Bereitstellung, Umwandlung und Nutzung von Energie freigesetzt werden und direkt oder indirekt zu Klimaänderungen beitragen. Dazu zählen
  - Kohlendioxid (CO<sub>2</sub>)
  - Methan (CH<sub>4</sub>)
  - Distickstoffoxid (N<sub>2</sub>O)
  - Stickoxide (NO<sub>x</sub>)
  - Kohlenmonoxid (CO)
  - Kohlenwasserstoffe (C<sub>x</sub>H<sub>y</sub>)
  - Schwefeldioxid (SO<sub>2</sub>)
  - weitere auf ihre Klimarelevanz zu überprüfende Spurengase;
4. bedeutet „Schaden“ eine Änderung mit negativen Auswirkungen auf die belebte oder unbelebte Umwelt, insbesondere Klimaänderungen, die erhebliche abträgliche Wirkungen auf die menschliche Gesundheit oder auf die Zusammensetzung, Widerstandsfähigkeit und Produktivität naturbelassener und vom Menschen beeinflusster Ökosysteme oder auf Materialien haben, die für die Menschheit nützlich sind;
5. sind „Vertragsparteien“ die Unterzeichner dieses Übereinkommens, sofern sich aus dem Wortlaut nicht anderes ergibt;
6. bedeutet „Organisation der regionalen Wirtschaftsintegration“ eine von souveränen Staaten einer bestimmten Region gebildete Organisation, die für die durch das Übereinkommen oder seine Protokolle erfaßten Angelegenheiten zuständig und im Einklang mit ihren internen Verfahren ordnungsgemäß ermächtigt ist, die betreffenden Übereinkünfte zu unterzeichnen, zu ratifizieren, anzunehmen, zu genehmigen oder ihnen beizutreten;
7. sind „Protokolle“ Protokolle zu diesem Übereinkommen;
8. ist „Sekretariat“ das Sekretariat des Übereinkommens;
9. sind „zuständige internationale Stellen“ jene Organisationen und Einrichtungen, die für den je-

weils genannten Sachbereich Befugnisse aufgrund von multilateralen Verträgen besitzen;

10. sind „Geberländer“ jene Staaten, die in Anhang 1 \*) aufgeführt sind. Dieser Anhang kann von den Vertragsparteien mit Zweidrittelmehrheit abgeändert werden;
11. sind „Nehmerländer“ jene Staaten, die in Anhang 2 \*) aufgeführt sind. Dieser Anhang kann von den Vertragsparteien mit Zweidrittelmehrheit abgeändert werden.

## Artikel II

### Allgemeine Verpflichtungen

(1) Zum Schutz des Menschen und seiner Umwelt für heutige und künftige Generationen vor den unmittelbaren und mittelbaren schädlichen Folgen und Risiken einer Anreicherung der Erdatmosphäre mit klimarelevanten Spurengasen verpflichten sich die Vertragsparteien, Beeinträchtigungen der Erdatmosphäre durch energiebedingte klimarelevante Spurengase zu vermeiden.

(2) Die Vertragsparteien erklären sich bereit, diejenigen Vertragsparteien zu unterstützen, deren eigene wirtschaftliche Leistungsfähigkeit für die Erfüllung von Pflichten nicht ausreicht, die aus diesem Übereinkommen oder aus Protokollen im Rahmen dieses Übereinkommens herrühren.

(3) Die Vertragsparteien erklären sich bereit, spätestens nach Inkrafttreten des Übereinkommens Verhandlungen über die Protokolle zu diesem Übereinkommen zu beginnen.

(4) Zu dem in Absatz (1) genannten Zweck verpflichten sich die Vertragsparteien, Maßnahmen zu ergreifen

- a) zur Begrenzung und Reduzierung der energiebedingten klimarelevanten Spurengasemissionen, wobei die Energieeinsparung, die rationelle Energienutzung und Umwandlung und die Nutzung erneuerbarer Energiequellen Priorität haben sollten;
- b) zur Verstärkung der bisherigen systematischen Beobachtung und Forschung über die Auswirkungen des zusätzlichen Treibhauseffektes auf das Klima und die Folgen befürchteter Klimaänderungen für den Menschen und die Umwelt sowie zum Austausch der erzielten Forschungsergebnisse;
- c) zur Zusammenarbeit bei der Durchführung des Übereinkommens sowie im Hinblick auf die Ausarbeitung, Annahme und Durchführung von Protokollen und Anlagen;
- d) zur Zusammenarbeit mit zuständigen internationalen Stellen.

(5) Die Vertragsparteien haben das Recht, für Maßnahmen zur Erfüllung ihrer Verpflichtungen gemäß diesem Übereinkommen und seinen Protokollen Mittel und Instrumente ihrer Wahl einzusetzen.

\*) Die Anhänge 1 und 2 bedürfen der Festlegung im Wege internationaler Verhandlungen.

(6) Die Vertragsparteien verpflichten sich, keine Maßnahmen zu ergreifen, die mit erheblichen Schäden und Risiken für die menschliche Gesundheit und Umwelt verbunden sind oder sein werden. Hierzu werden die Vertragsparteien die zu treffenden Maßnahmen vorab auf ihre Umweltverträglichkeit untersuchen.

(7) Die Geberländer erklären sich bereit, die Unterstützung nach Abs. 2 in Form finanzieller Mittel zu leisten, die im Rahmen eines zu diesem Zwecke einzurichtenden internationalen Treuhandfonds zur Reduktion energiebedingter klimarelevanter Spurengasemissionen und zur Förderung eines umweltverträglichen Technologietransfers und einer bedarfsgerechten Technologieentwicklung zur Verfügung gestellt und verwendet werden. Einzelheiten regelt ein Protokoll zu diesem Übereinkommen.

(8) Die Vertragsparteien erklären sich bereit, eine Kontrolle der eingegangenen Verpflichtungen vorzusehen. Einzelheiten werden in den Protokollen zu dieser Vereinbarung geregelt.

### **Artikel III Forschung**

(1) Die Vertragsparteien verpflichten sich – unabhängig von der sofortigen Einleitung weitreichender Reduktionsmaßnahmen –, soweit es angebracht ist, unmittelbar oder über zuständige internationale Stellen, Forschungsarbeiten und wissenschaftliche Bewertungen in bezug auf folgende Bereiche einzuleiten oder fortzuführen:

- a) Politische, wirtschaftliche, soziale und demographische Ursachen der Emission energiebedingter klimarelevanter Spurengase;
- b) Verständnis des Klima- und Atmosphärensystems einschließlich ihrer Interaktion mit anderen natürlichen Systemen, vor allem der Ozeane;
- c) Quantifizierung und Qualifizierung des Einflusses energiebedingter klimarelevanter Spurengasemissionen auf natürliche Systeme, vorrangig das Klimasystem;
- d) direkte und indirekte Auswirkungen einer Verstärkung des zusätzlichen Treibhauseffektes auf den Menschen, seine Gesundheit, die natürlichen Umweltsysteme, sowie seine wirtschaftlichen, sozialen, politischen und technischen Systeme;
- e) eine Untersuchung regionaler Besonderheiten und Empfindlichkeiten im Hinblick auf Klimaveränderungen infolge einer Verstärkung des zusätzlichen Treibhauseffektes;
- f) nationale, regionale und weltweite Untersuchungen über technische und wirtschaftliche Potentiale der Reduktion energiebedingter klimarelevanter Spurengasemissionen in den Endenergiesektoren Haushalte, Kleinverbrauch (Handwerk, Dienstleistungsbereiche, öffentliche Einrichtungen etc.), Industrie, Verkehr und im Energieumwandlungssektor;

g) Strategien zur Minderung und Vermeidung energiebedingter klimarelevanter Spurengasemissionen und Untersuchungen über die Wirksamkeit bereits eingeleiteter Maßnahmen.

(2) Die Vertragsparteien verpflichten sich, im Rahmen dieser Forschungen unmittelbar oder mittelbar über die zuständigen Organe dieses Übereinkommens zusammenzuarbeiten und die regelmäßige und rechtzeitige Sammlung und Übermittlung von Ergebnissen der Forschungs- und Bewertungsarbeiten zu gewährleisten.

### **Artikel IV Messung und Beobachtung**

(1) Die Vertragsparteien verpflichten sich, unmittelbar oder mittelbar über die zuständigen internationalen Stellen auf nationaler und internationaler Ebene gemeinsame und einander ergänzende Programme zur systematischen Beobachtung, Bewertung und Bilanzierung der Wechselwirkungen zwischen der Atmosphäre, den Ozeanen und den Wäldern im Zusammenhang mit dem zusätzlichen Treibhauseffekt, wie sie in Anlage 1 spezifiziert sind, zu fördern oder aufzustellen und durchzuführen.

(2) Die Vertragsparteien verpflichten sich, unmittelbar oder mittelbar über die zuständigen Stellen zusammenzuarbeiten, um die regelmäßige und rechtzeitige Sammlung, Bestätigung und Übermittlung von Meß- und Beobachtungsdaten durch geeignete Datenzentralen zu gewährleisten. In diesem Bereich sollte, wo immer möglich, der Grundsatz des öffentlichen Zugangs zu wichtigen Umweltinformationen verwirklicht werden.

(3) Die Vertragsparteien verpflichten sich, im Rahmen der Konferenz der Vertragsparteien regelmäßig eine Bewertung der Meß- und Beobachtungsdaten vorzunehmen.

### **Artikel V Zusammenarbeit, Informationsaustausch und Koordination bei Forschung, Messung, Beobachtung**

(1) Die Vertragsparteien ermöglichen und fördern unter besonderer Beachtung eines in Anlage II besonders kenntlich gemachten Mindestkatalogs von Berichtsgegenständen den Austausch sozioökonomischer und wissenschaftlich-technischer Informationen, die für dieses Übereinkommen erheblich sind. Dieser Austausch erfolgt bilateral mit den anderen Vertragsparteien und auch mit den Organen dieses Übereinkommens.

(2) Die Vertragsparteien verpflichten sich, dem Sekretariat über die von ihnen getroffenen Maßnahmen zur Durchführung dieses Übereinkommens sowie der Protokolle, deren Vertragspartei sie sind, regelmäßig und unter Beachtung eines einheitlichen Mindestkataloges von Berichtsgegenständen zu berichten. Diese Berichte sind öffentlich zugänglich zu machen.

(3) Die Vertragsparteien berücksichtigen bei der Aufstellung von Forschungs-, Meß- und Beobachtungsprogrammen nach Art. III und IV bereits geplante, laufende oder durchgeführte Aktivitäten gleichgerichteter Art.

## **Artikel VI** **Öffentlichkeitsarbeit**

Die Vertragsparteien fördern einzeln oder in Zusammenarbeit mit den zuständigen Organen dieses Übereinkommens sowie den Vereinten Nationen das öffentliche Bewußtsein über die Auswirkungen einer Verstärkung des zusätzlichen Treibhauseffekts für den Menschen, seine Gesundheit und die Umwelt sowie auch über die zu erwartenden wirtschaftlichen und sozialen Folgen für die gegenwärtigen und die zukünftigen Generationen. Die Vertragsparteien, die Nehmerländer sind, können zu diesem Zweck bei den zuständigen Organen dieses Übereinkommens finanzielle und technische Hilfe beantragen.

## **Artikel VII** **Konferenz der Vertragsparteien**

(1) Hiermit wird eine Konferenz der Vertragsparteien eingesetzt. Die erste Tagung der Konferenz der Vertragsparteien wird von dem nach Artikel VIII vorläufig bestimmten Sekretariat spätestens 6 Monate nach Inkrafttreten dieses Übereinkommens einberufen. Danach finden ordentliche Tagungen der Konferenz der Vertragsparteien in regelmäßigen Abständen – mindestens jedoch einmal pro Jahr – statt. Näheres legt die Konferenz der Vertragsparteien auf ihrer ersten Tagung fest.

(2) Außerordentliche Tagungen der Konferenz der Vertragsparteien finden statt, wenn es die Konferenz für notwendig erachtet oder wenn eine Vertragspartei dies schriftlich beim Sekretariat beantragt, sofern dieser Antrag innerhalb von sechs Monaten nach seiner Übermittlung durch das Sekretariat von mindestens einem Drittel der Vertragsparteien unterstützt wird.

(3) Die Konferenz der Vertragsparteien vereinbart und beschließt durch Konsens für sich selbst und von ihr gegebenenfalls einzusetzende Nebenorgane eine Geschäftsordnung und eine Finanzordnung. Sie entscheidet durch Konsens über die Geschäfts- und Finanzordnung sowie den Leiter des Sekretariats.

(4) Die Konferenz der Vertragsparteien

- prüft laufend die Durchführung des Übereinkommens und trifft die für die Durchführung notwendigen Entscheidungen mit Konsens, soweit nichts anderes vorgesehen ist,
- entscheidet über den Haushalt,
- setzt nach Bedarf Arbeitsgruppen ein, um Angelegenheiten im Zusammenhang mit der Durchführung und Entwicklung dieses Übereinkommens oder seiner Protokolle zu prüfen und zu diesem Zweck geeignete Untersuchungen durchzuführen

und sonstige Unterlagen zu erarbeiten sowie dem Sekretariat Empfehlungen zur Prüfung zu unterbreiten,

- überträgt dem Sekretariat Befugnisse zur Durchführung der von ihr getroffenen Entscheidungen. Die Konferenz der Vertragsparteien kann bestimmte Modalitäten für die Ausübung dieser Befugnisse festlegen.

(5) Die Vereinten Nationen und ihre Einrichtungen, internationale Organisationen sowie jeder Staat, der nicht Vertragspartei des Übereinkommens ist, können sich auf den Tagungen der Konferenz der Vertragsparteien durch Beobachter vertreten lassen. Jede Stelle, national oder international, staatlich oder nichtstaatlich, die auf Gebieten im Zusammenhang mit dem Regelungsinhalt dieser Konvention fachlich befähigt ist und dem Sekretariat ihren Wunsch mitgeteilt hat, sich auf einer Tagung der Konferenz der Vertragsparteien als Beobachter vertreten zu lassen, kann zugelassen werden, sofern nicht mindestens ein Drittel der anwesenden Vertragsparteien widerspricht. Die Vertragsparteien können zuständige Stellen oder einzelne Experten auffordern, an den Sitzungen teilzunehmen. Die Zulassung und Teilnahme von Beobachtern unterliegen der von der Konferenz der Vertragsparteien beschlossenen Geschäftsordnung. Diese Geschäftsordnung kann unterscheiden zwischen Organisationen mit allgemeinem konsultativen Status, Organisationen mit besonderem konsultativen Status und anderen Organisationen.

## **Artikel VIII** **Sekretariat**

(1) Das Sekretariat hat folgende Aufgaben

- es unterstützt die Konferenz der Vertragsparteien bei der Durchführung dieses Übereinkommens;
- es erarbeitet Empfehlungen und Stellungnahmen zur Durchführung dieses Übereinkommens oder seiner Protokolle, soweit es dies für notwendig erachtet oder wenn mindestens ein Drittel der Vertragsparteien eine entsprechende Aufforderung an das Sekretariat gerichtet haben;
- es übt die Befugnisse aus, die die Konferenz der Vertragsparteien dieses Übereinkommens oder seiner Protokolle ihm zur Durchführung der von ihr erlassenen Bestimmung überträgt;
- es prüft die nach Art. V vorzulegenden Berichte und erstattet hierüber der Konferenz der Vertragsparteien Bericht;
- es sammelt, prüft und bereitet die wissenschaftlichen Informationen über Klimaveränderungen infolge des zusätzlichen Treibhauseffekts und mögliche Auswirkungen solcher Veränderungen vor;
- es setzt eine Sachverständigengruppe nach Art. X Abs. 2 dieses Übereinkommens ein, wirkt als ihr Sekretariat und leitet deren Berichte mit einer eigenen Stellungnahme an die Konferenz der Vertragsparteien weiter;



- es unterstützt die in Art. XIII beschriebene Beilegung von Streitigkeiten;
- es nimmt gegebenenfalls für wissenschaftliche Forschungsarbeiten, systematische Beobachtungen und andere mit den Zielen des Übereinkommens zusammenhängende Tätigkeiten die Dienste zuständiger internationaler staatlicher oder nichtstaatlicher Stellen und wissenschaftlicher Ausschüsse in Anspruch, insbesondere der WMO, der FAO und des UNEP, und verwendet, soweit es angemessen ist, Informationen, die von diesen Stellen und Ausschüssen stammen;
- es gibt sich vorbehaltlich der Zustimmung der Konferenz der Vertragsparteien eine Geschäfts- und eine Finanzordnung, erarbeitet Berichte über seine Tätigkeit und über den Stand wissenschaftlicher Informationen über Klimaveränderungen im Rahmen dieses Übereinkommens und legt sie der Konferenz der Vertragsparteien spätestens vier Wochen vor Beginn seiner ordentlichen Tagungen vor;
- es bereitet die in Art. VII vorgesehenen Tagungen vor und stellt die entsprechenden Dienste bereit.

(2) Die Sekretariatsaufgaben werden bis zum Abschluß der ersten ordentlichen Tagung der Konferenz der Vertragsparteien, die nach Artikel VII abgehalten wird, vorläufig von Umweltprogramm der Vereinten Nationen wahrgenommen.

(3) Das Sekretariat erhält eine der Aufgabenstruktur entsprechende personelle und finanzielle Ausstattung. Die personelle Zusammensetzung des Sekretariats soll eine angemessene Beteiligung aller Weltregionen gewährleisten.

### Artikel IX

#### Beschlußfassung über Protokolle

(1) Die Konferenz der Vertragsparteien kann auf einer Tagung Protokolle nach Artikel II beschließen.

(2) Der Wortlaut eines vorgeschlagenen Protokolls wird den Vertragsparteien mindestens 6 Monate vor der betreffenden Tagung der Konferenz der Vertragsparteien vom Sekretariat übermittelt.

### Artikel X

#### Überprüfung und Änderung des Übereinkommens oder von Protokollen

(1) Die Vertragsparteien verpflichten sich, die Bestimmungen im Lichte der gesammelten Erfahrungen und auf der Grundlage der verfügbaren wissenschaftlichen, umweltbezogenen, technischen und wirtschaftlichen Informationen zu überprüfen und den Erfordernissen anzupassen.

Wo möglich und sachlich geboten, soll diese Überprüfung im Zusammenhang mit der Überprüfung aller bestehenden Übereinkommen, die einen Beitrag zum Schutz der Erdatmosphäre leisten, vorgenommen werden, mit dem Ziel, alle diese Übereinkommen zu einer Gesamtkonvention zum Schutz der Erdatmo-

sphäre zusammenzuführen. Diese Überprüfung findet spätestens 1998 während einer Vertragsstaatenkonferenz statt.

(2) Mindestens ein Jahr vor der Konferenz der Vertragsparteien, auf der über eine Überprüfung und Änderung gemäß Absatz 1 entschieden wird, wird auf Einladung des Sekretariats dieses Übereinkommens eine Gruppe von Sachverständigen zusammentreten, um die in diesem Übereinkommen formulierten Ziele und Maßnahmen auf der Grundlage verfügbarer wissenschaftlicher, umweltbezogener, technischer und wirtschaftlicher Informationen zu bewerten und Empfehlungen für die Überführung der Regelungsinhalte dieser Konvention in eine Gesamtkonvention zum Schutz der Erdatmosphäre an die Vertragsparteien formulieren. Der Bericht der Sachverständigen soll spätestens sechs Monate vor der Konferenz gemäß Absatz 1 durch das Sekretariat an die Vertragsparteien übermittelt werden.

(3) Jede Vertragspartei kann Änderungen dieses Übereinkommens oder eines Protokolls vorschlagen. In diesen Änderungen werden unter anderem einschlägige wissenschaftliche und technische Erwägungen gebührend berücksichtigt.

(4) Die Konferenz gemäß Abs. 1 wird erörtern, ob und inwiefern die institutionellen Strukturen dieses Abkommens eine wirksame Durchführung der notwendigen Maßnahmen zum Schutz der Erdatmosphäre erlaubt und fördert. Sie wird dabei insbesondere auch prüfen, ob zur Vorbereitung, zum Beschluß und zur Durchführung ein neues Organ einzuführen ist, das ähnliche Befugnisse wie der Sicherheitsrat der Vereinten Nationen erhält.

(5) Änderungen und Ergänzungen dieses Übereinkommens werden auf den Tagungen der Konferenz der Vertragsparteien beschlossen. Änderungen und Ergänzungen der Protokolle werden von den Konferenzen der Vertragsparteien dieser Protokolle beschlossen. Der Wortlaut einer vorgeschlagenen Änderung oder Ergänzung des Übereinkommens muß den Vertragsparteien mindestens sechs Monate vor der Tagung, auf der die Änderung oder Ergänzung zur Beschlußfassung vorgeschlagen wird, übermittelt werden. Das Sekretariat übermittelt vorgeschlagene Änderungen und Ergänzungen auch den Unterzeichnern des Übereinkommens zur Kenntnisnahme.

(6) Die Vertragsparteien bemühen sich nach Kräften um eine Einigung durch Konsens über eine vorgeschlagene Änderung des Übereinkommens. Sind alle Bemühungen um einen Konsens erschöpft und wird keine Einigung erzielt, so wird als letztes Mittel die Änderung mit Dreiviertelmehrheit der auf der Sitzung anwesenden und abstimmenden Vertragsparteien beschlossen und vom Verwahrer allen Vertragsparteien zur Ratifikation, Genehmigung oder Annahme vorgelegt.

(7) Das Verfahren nach Absatz 6 gilt für Änderungen von Protokollen; jedoch reicht für die Beschlußfassung darüber eine Zweidrittelmehrheit der auf der Sitzung anwesenden und abstimmenden Vertragsparteien des Protokolls aus.

(8) Die Ratifikation, Genehmigung oder Annahme von Änderungen wird dem Verwahrer schriftlich noti-

fiziert. Nach Absatz 6 oder 7 beschlossene Änderungen treten zwischen den Vertragsparteien, die sie angenommen haben, am neunzigsten Tag nach dem Zeitpunkt in Kraft, zu dem der Verwahrer die Notifikation der Ratifikation, Genehmigung oder Annahme durch mindestens drei Viertel der Vertragsparteien des Übereinkommens oder durch mindestens zwei Drittel der Vertragsparteien des betreffenden Protokolls, sofern in dem Protokoll nichts anderes vorgesehen ist, empfangen hat. Danach treten die Änderungen für jede andere Vertragspartei am neunzigsten Tag nach dem Zeitpunkt in Kraft, zu dem die betreffende Vertragspartei ihre Urkunde über die Ratifikation, Genehmigung oder Annahme der Änderung hinterlegt hat.

(9) Eine Vertragspartei, die eine Änderung oder Ergänzung zu diesem Übereinkommen nicht genehmigt, ratifiziert oder annimmt, notifiziert dies dem Verwahrer dieses Übereinkommens in schriftlicher Form innerhalb von sechs Monaten nach dem Zeitpunkt der Konferenz der Vertragsparteien, auf der die Änderung oder Ergänzung beschlossen worden ist. Der Verwahrer verständigt unverzüglich alle Vertragsparteien und das Sekretariat dieses Übereinkommens vom Empfang jeder derartigen Notifikation. Eine Vertragspartei kann jederzeit eine Änderung oder Ergänzung dieses Übereinkommens annehmen, gegen die sie zuvor Einspruch eingelegt hat. Diese Änderung oder Ergänzung des Übereinkommens tritt daraufhin für die betreffende Vertragspartei in Kraft, sofern nicht das Inkrafttreten zu einem in (8) geregelten späteren Zeitpunkt erfolgt.

(10) Nach Ablauf von sechs Monaten nach dem Zeitpunkt, an dem die Vertragsparteien die Änderung oder Ergänzung des Übereinkommens beschlossen haben, wird die Änderung oder Ergänzung für alle Vertragsparteien dieses Übereinkommens, die keine Notifikation gemäß (8) an den Verwahrer geschickt haben, wirksam.

(11) Im Sinne dieses Artikels bedeutet „anwesende und abstimmende Vertragsparteien“ die anwesenden Vertragsparteien, die eine Ja-Stimme oder eine Nein-Stimme abgeben.

## Artikel XI

### Beschlußfassungen über Anlagen und Änderung von Anlagen

(1) Die Anlagen dieses Übereinkommens oder eines Protokolls sind Bestandteil des Übereinkommens beziehungsweise des betreffenden Protokolls. Anlagen zu diesem Übereinkommen betreffen wissenschaftliche, technische, haushalts- und verwaltungsmäßige Angelegenheiten. Sofern nicht ausdrücklich etwas anderes vorgesehen ist, ist eine Bezugnahme auf dieses Übereinkommen gleichbedeutend mit einer Bezugnahme auf alle seine Anlagen.

(2) Der Wortlaut einer vorgeschlagenen neuen Anlage oder einer vorgeschlagenen Änderung einer Anlage wird den Vertragsparteien dieses Übereinkommens spätestens sechs Monate vor der Tagung, auf der die neue Anlage oder die Änderung einer beste-

henden Anlage zur Beschlußfassung vorgeschlagen wird, durch das Sekretariat übermittelt. Vorgeschlagene neue Anlagen oder Änderungen von Anlagen werden auch den Unterzeichnern dieses Übereinkommens übermittelt.

(3) Eine Vertragspartei, die eine neue Anlage oder die Änderung einer bereits in Kraft befindlichen Anlage zu diesem Übereinkommen nicht genehmigt, ratifiziert oder annimmt, notifiziert dies dem Verwahrer dieses Übereinkommens in schriftlicher Form innerhalb von sechs Monaten nach dem Zeitpunkt der Konferenz der Vertragsparteien, auf der die neue Anlage oder die Änderung einer bereits in Kraft befindlichen Anlage beschlossen worden ist. Der Verwahrer verständigt unverzüglich alle Vertragsparteien und das Sekretariat dieses Übereinkommens vom Empfang jeder derartigen Notifikation. Eine Vertragspartei kann jederzeit eine neue Anlage oder die Änderung einer bereits in Kraft befindlichen Anlage annehmen, gegen die sie zuvor Einspruch eingelegt hat. Diese neue Anlage oder die Änderung der Anlage tritt daraufhin für die betreffende Vertragspartei in Kraft, sofern nicht das Inkrafttreten zu einem in (4) oder in (5) geregelten späteren Zeitpunkt erfolgt.

(4) Nach Ablauf von sechs Monaten nach dem Zeitpunkt, zu dem die Vertragsparteien die neue Anlage oder die Änderung einer bereits in Kraft befindlichen Anlage beschlossen haben, wird die Anlage oder Änderung der Anlage für alle Vertragsparteien dieses Übereinkommens, die keine Notifikation gemäß (3) an den Verwahrer geschickt haben, wirksam.

(5) Hat eine neue Anlage oder die Änderung einer bereits in Kraft befindlichen Anlage zu diesem Übereinkommen eine Änderung des Übereinkommens selbst zur Folge, so tritt diese neue oder geänderte Anlage erst zu dem selben Zeitpunkt wie auch die Änderung des Übereinkommens in Kraft.

## Artikel XII

### Haushalt

(1) Gemäß den Bestimmungen dieses Artikels wird das Übereinkommen durch Pflichtbeiträge finanziert, die durch freiwillige Beiträge ergänzt werden. Die Beiträge können in konvertierbarer Währung, nicht-konvertierbarer Währung oder als Sachleistung erbracht werden.

(2) Alle Vertragsparteien dieses Übereinkommens zahlen Pflichtbeiträge auf einer jährlichen Grundlage entsprechend dem für die Aufschlüsselung der Ausgaben der Vereinten Nationen aufgestellten Schema. Die Vertragsparteien werden sich darauf einigen, nach welchen Grundsätzen die Pflichtbeiträge für die einzelnen Protokolle festgelegt werden.

(3) Die jährlichen Ausgaben werden durch die Pflichtbeiträge gedeckt. Die Bar- und Sachleistungen werden im jährlichen Bericht des Sekretariats aufgeschlüsselt. Die Konferenz der Vertragsparteien kann die freiwilligen Beiträge dazu verwenden, entweder Pflichtbeiträge zu senken oder besondere Tätigkeiten im Rahmen des Übereinkommens zu finanzieren.

(4) Der Jahreshaushalt wird vom Sekretariat entworfen und der Konferenz der Vertragsparteien zur Entscheidung vorgelegt.

### **Artikel XIII** **Beilegen von Streitigkeiten**

(1) Im Fall einer Streitigkeit zwischen Vertragsparteien über die Auslegung oder Anwendung dieses Übereinkommens bemühen sich die betroffenen Parteien um eine Lösung durch Verhandlungen.

(2) Können die betroffenen Parteien eine Einigung durch Verhandlungen nicht erreichen, so können sie gemeinsam die guten Dienste einer dritten Partei in Anspruch nehmen oder um deren Vermittlung ersuchen.

(3) Bei der Ratifikation, der Annahme oder der Genehmigung des Übereinkommens oder beim Beitritt zum Übereinkommen oder jederzeit danach können ein Staat oder eine Organisation der regionalen Wirtschaftsintegration erklären, daß sie für eine Streitigkeit, die nicht nach Absatz 1 oder 2 gelöst wird, eines der folgenden Mittel der Streitbeilegung oder beide als obligatorisch anerkennen:

- a) ein Schiedsverfahren nach dem von der Konferenz der Vertragsparteien auf ihrer ersten ordentlichen Tagung anzunehmenden Verfahren;
- b) Vorlage der Streitigkeit an den Internationalen Gerichtshof.

(4) Haben die Parteien nicht nach Absatz 3 demselben oder einem der Verfahren zugestimmt, so wird die Streitigkeit einem Vergleich nach Absatz 5 unterworfen, sofern die Parteien nichts anderes vereinbaren.

(5) Eine Vergleichskommission wird auf Antrag einer der Streitparteien gebildet. Die Kommission setzt sich aus einer gleichen Anzahl von durch jede der betroffenen Parteien bestellten und einem von den durch jede Partei bestellten Mitgliedern gemeinsam gewählten Vorsitzenden zusammen. Die Kommission fällt einen endgültigen Spruch mit empfehlender Wirkung, den die Parteien nach Treu und Glauben berücksichtigen.

(6) Dieser Artikel findet auf jedes Protokoll Anwendung, sofern in dem betreffenden Protokoll nichts anderes vorgesehen ist.

### **Artikel XIV** **Sanktionen**

(1) Die Vertragsstaatenkonferenz kann mit Zweidrittelmehrheit beschließen, welche Maßnahmen zu ergreifen sind, um ihren Beschlüssen Wirksamkeit zu verleihen.

Hierzu zählen

- a) die Veröffentlichung der Vertragsverstöße im jährlich vom Sekretariat zu erstellenden Bericht;
- b) die Suspendierung aller oder eines Teils der Mitgliedschaftsrechte einer Vertragspartei aus dem Übereinkommen und/oder den Protokollen;

c) die Einstellung oder Kürzung von Zahlungen oder sonstigen Leistungen, die einer Vertragspartei aus dem Übereinkommen und/oder den Protokollen zustünden;

d) die Rückforderung von Zahlungen und/oder sonstigen Leistungen, die eine Vertragspartei bereits aus dem Übereinkommen und/oder den Protokollen erhalten hat;

e) die Ausschließung der Vertragspartei aus dem Übereinkommen und/oder den Protokollen.

(2) Die Vertragsstaatenkonferenz entscheidet je nach Ausmaß des Vertragsbruchs nach ihrem Ermessen über die zu ergreifenden Maßnahmen.

### **Artikel XV** **Unterzeichnung**

### **Artikel XVI** **Ratifikation, Annahme oder Genehmigung**

(1) Dieses Übereinkommen und jedes Protokoll bedürfen der Ratifikation, Annahme oder Genehmigung durch die Staaten und durch die Organisationen der regionalen Wirtschaftsintegration. Die Ratifikations-, Annahme- oder Genehmigungsurkunden werden beim Verwahrer hinterlegt.

(2) Jede in Absatz 1 bezeichnete Organisation, die Vertragspartei des Übereinkommens oder eines Protokolls wird, ohne daß einer ihrer Mitgliedstaaten Vertragspartei ist, ist durch alle Verpflichtungen aus dem Übereinkommen beziehungsweise der Protokolle gebunden. Sind ein oder mehrere Mitgliedstaaten einer solchen Organisation Vertragspartei des Übereinkommens oder des betreffenden Protokolls, so entscheiden die Organisation und ihre Mitgliedstaaten über ihre jeweiligen Verantwortlichkeiten hinsichtlich der Erfüllung ihrer Verpflichtungen aus dem Übereinkommen beziehungsweise dem Protokoll. In diesen Fällen sind die Organisation und die Mitgliedstaaten nicht berechtigt, die Rechte aufgrund des Übereinkommens oder des betreffenden Protokolls gleichzeitig auszuüben.

(3) In ihren Ratifikations-, Annahme- oder Genehmigungsurkunden erklären die in Absatz 1 bezeichneten Organisationen den Umfang ihrer Zuständigkeiten in bezug auf die durch das Übereinkommen oder das betreffende Protokoll erfaßten Angelegenheiten. Diese Organisationen teilen dem Verwahrer auch jede wesentliche Änderung des Umfangs ihrer Zuständigkeit mit.

### **Artikel XVII** **Beitritt**

(1) Dieses Übereinkommen und jedes Protokoll stehen von dem Tag an, an dem sie nicht mehr zur Unterzeichnung aufliegen, Staaten und Organisationen der regionalen Wirtschaftsintegration zum Beitritt offen. Die Beitrittsurkunden werden beim Verwahrer hinterlegt.

(2) In ihren Beitrittsurkunden erklären die in Absatz 1 bezeichneten Organisationen den Umfang ihrer Zuständigkeiten in bezug auf die durch das Übereinkommen oder das betreffende Protokoll erfaßten Angelegenheiten. Diese Organisationen teilen dem Verwahrer auch jede wesentliche Änderung des Umfangs ihrer Zuständigkeiten mit.

(3) Artikel XVI Absatz 2 findet auf Organisationen der regionalen Wirtschaftsintegration, die dem Übereinkommen oder einem Protokoll beitreten, Anwendung.

### **Artikel XVIII Stimmrecht**

(1) Jede Vertragspartei dieses Übereinkommens hat eine Stimme.

(2) Unbeschadet des Absatzes 1 üben die Organisationen der regionalen Wirtschaftsintegration in Angelegenheiten ihrer Zuständigkeit ihr Stimmrecht mit der Anzahl von Stimmen aus, die der Anzahl ihrer Mitgliedstaaten entspricht, die Vertragsparteien des Übereinkommens oder des betreffenden Protokolls sind. Diese Organisationen üben ihr Stimmrecht nicht aus, wenn ihre Mitgliedstaaten ihr Stimmrecht ausüben, und umgekehrt.

(3) Die Aufteilung der Stimmrechte kann in den einzelnen Protokollen abweichend von Abs. 1 geregelt werden.

### **Artikel XIX**

#### **Verhältnis zwischen dem Rahmenübereinkommen und seinen Protokollen**

(1) Ein Staat oder eine Organisation der regionalen Wirtschaftsintegration kann nicht Vertragspartei eines Protokolls werden, ohne Vertragspartei des Übereinkommens zu sein oder gleichzeitig zu werden.

(2) Beschlüsse betreffend ein Protokoll werden nur von den Vertragsparteien dieses Protokolls gefaßt.

### **Artikel XX Inkrafttreten**

(1) Dieses Übereinkommen tritt am neunzigsten Tag nach dem Zeitpunkt der Hinterlegung der zwanzigsten Ratifikations-, Annahme-, Genehmigungs- oder Beitrittsurkunde in Kraft.

(2) Jedes Protokoll tritt, sofern in dem Protokoll nichts anderes vorgesehen ist, am neunzigsten Tag nach dem Zeitpunkt der Hinterlegung der elften Urkunde über die Ratifikation, Annahme oder Genehmigung des Protokolls oder über den Beitritt dazu in Kraft.

(3) Für jede Vertragspartei, die nach der Hinterlegung der zwanzigsten Ratifikations-, Annahme-, Genehmigungs- oder Beitrittsurkunde das Übereinkommen ratifiziert, annimmt oder genehmigt oder ihm beitrifft, tritt das Übereinkommen am neunzigsten Tag

nach dem Zeitpunkt der Hinterlegung der Ratifikations-, Annahme-, Genehmigungs- oder Beitrittsurkunde durch die betreffende Vertragspartei in Kraft.

(4) Jedes Protokoll tritt, sofern in dem Protokoll nichts anderes vorgesehen ist, für eine Vertragspartei, die das Protokoll nach dem Inkrafttreten gemäß Absatz 2 ratifiziert, annimmt oder genehmigt oder ihm beitrifft, am neunzigsten Tag nach dem Zeitpunkt in Kraft, zu dem diese Vertragspartei ihre Ratifikations-, Annahme-, Genehmigungs- oder Beitrittsurkunde hinterlegt, oder zu dem Zeitpunkt, zu dem das Übereinkommen für diese Vertragspartei in Kraft tritt, falls dies der spätere Zeitpunkt ist.

(5) Für die Zwecke der Absätze 1 und 2 zählt eine von einer Organisation der regionalen Wirtschaftsintegration hinterlegte Urkunde nicht als zusätzliche Urkunde zu den von den Mitgliedstaaten der betreffenden Organisation hinterlegten Urkunden.

### **Artikel XXI Vorbehalte**

Vorbehalte zu diesem Übereinkommen sind nicht zulässig.

### **Artikel XXII Rücktritt**

(1) Eine Vertragspartei kann jederzeit nach Ablauf von vier Jahren nach dem Zeitpunkt, zu dem dieses Übereinkommen für sie in Kraft getreten ist, durch eine an den Verwahrer gerichtete schriftliche Notifikation vom Übereinkommen zurücktreten.

(2) Sofern in einem Protokoll nichts anderes vorgesehen ist, kann eine Vertragspartei des Protokolls jederzeit nach Ablauf von vier Jahren nach dem Zeitpunkt, zu dem das Protokoll für sie in Kraft getreten ist, durch eine an den Verwahrer gerichtete schriftliche Notifikation vom Protokoll zurücktreten.

(3) Der Rücktritt wird nach Ablauf eines Jahres nach dem Eingang der Notifikation beim Verwahrer oder zu einem gegebenenfalls in der Rücktrittnotifikation genannten späteren Zeitpunkt wirksam.

(4) Eine Vertragspartei, die vom Übereinkommen zurücktritt, gilt auch als von den Protokollen zurückgetreten, deren Vertragspartei sie ist.

### **Artikel XXIII Verwahrer**

(1) Der Generalsekretär der Vereinten Nationen übernimmt die Aufgabe des Verwahrers dieses Übereinkommens und der Protokolle.

(2) Der Verwahrer unterrichtet die Vertragsparteien insbesondere

a) von der Unterzeichnung des Übereinkommens und jedes Protokolls sowie von der Hinterlegung der

- Ratifikations-, Annahme-, Genehmigungs- oder Beitrittsurkunden nach den Artikeln XVI und XVII;
- b) von dem Zeitpunkt, zu dem das Übereinkommen und jedes Protokoll nach Artikel XX in Kraft treten;
- c) von Rücktrittsnotifikationen nach Artikel XXII;
- d) von Änderungen, die in bezug auf das Übereinkommen oder ein Protokoll beschlossen worden sind, von ihrer Annahme durch die Vertragsparteien sowie vom Zeitpunkt ihres Inkrafttretens nach Artikel X;
- e) von allen Mitteilungen im Zusammenhang mit der Beschlußfassung über Anlagen, ihrer Genehmigung und ihrer Änderung nach Artikel XI;
- f) von Notifikationen der Organisationen der regionalen Wirtschaftsintegration über den Umfang ihrer Zuständigkeiten in bezug auf Angelegenheiten, die durch das Übereinkommen und durch Protokolle erfaßt sind, sowie über jede Änderung dieses Umfangs;
- g) von Erklärungen nach Artikel XIII Absatz 3.

#### Artikel XXIV

##### Verbindlicher Wortlaut

Anlage I: Zu Artikel IV (1)

Anlage II: Zu Artikel V (1)

Anhang 1: Geberländer

Anhang 2: Nehmerländer

#### 4. Mögliche Zusatzvereinbarungen zu einer Internationalen Konvention über Klima und Energie

Neben der Unterzeichnung der Konvention, in der die Vertragsparteien sich dazu verpflichten sollten, unverzüglich Maßnahmen und Strategien zur Eindämmung des zusätzlichen Treibhauseffekts zu ergreifen und zu entwickeln, kommt der Aushandlung von Protokollen, die der Umsetzung dieser allgemeinen Vereinbarung dienen, entscheidende Bedeutung zu. Die Enquete-Kommission sieht es als notwendig an, daß die Konvention im Wege internationaler Verhandlungen schnellstmöglich durch ein Protokoll über energiebedingte klimarelevante Spurengase, die zur Verstärkung des Treibhauseffekts führen, und eine Vereinbarung über einen internationalen Treuhandfonds zur Reduktion energiebedingter klimarelevanter Spurengasemissionen konkretisiert wird.

Im Gegensatz zu ihrem Vorgehen in Hinblick auf die Ausarbeitung eines detaillierten Konventionsentwurfs hält es die Kommission dabei zum jetzigen Zeitpunkt nicht für sinnvoll, zu allen in den Protokollen zu regelnden Fragen konkrete Vorschläge zu unterbreiten. Ziel der Anstrengungen sollte es zunächst sein, bis zur UN-Konferenz über Umwelt und Entwicklung,

während der die Internationale Konvention über Klima und Energie verabschiedet werden soll, Eini-gung über die Regelungsbereiche und grundsätzliche Regelungsinhalte der Protokolle, insbesondere die globalen Reduktionsziele, zu erzielen.

Hierzu unterbreitet die Kommission in der Folge Vor-schläge, die für die schnellstmöglich aufzunehmenden internationalen Verhandlungen als Basis dienen können.

Diese Vorschläge sollten auf nationaler Ebene weiter konkretisiert werden. Die Enquete-Kommission emp-fiehlt zu diesem Zweck dem Deutschen Bundestag, in der kommenden Wahlperiode dafür Sorge zu tragen, daß konkrete Empfehlungen für die Ausgestaltung und Verabschiedung von Protokollen erarbeitet wer-den. Bei diesem Vorhaben sollten der Abschlußbe-richt der Projektleiter zu Studienkomplex E des Stu-dienprogramms und die entsprechenden Einzelstu-dien als Grundlage dienen, die wichtige Anregungen und Vorschläge zur Ausgestaltung der vorgeschlage-nen Protokolle enthalten.

#### 4.1. Das Protokoll über die Reduktion energiebedingter klimarelevanter Spurengasemissionen (Spurengas-Protokoll)

Das Spurengas-Protokoll sollte die Emissionen aller energiebedingten klimarelevanten Spurengase re-geln, auch wenn allein der Anteil des Kohlendioxids 40 Prozent beträgt. Eine Nicht-Regelung der anderen energiebedingten klimarelevanten Spurengase im Protokoll könnte dazu führen, daß bei einer Substi-tution von CO<sub>2</sub>-intensiven Technologien durch weniger CO<sub>2</sub>-intensive Technologien der Anteil der anderen energiebedingten Spurengasemissionen ansteigt.

Hinzu kommt, daß besonders einige dieser anderen energiebedingten klimarelevanten Spurengase (Me-than (CH<sub>4</sub>), Stickoxide (NO<sub>x</sub>) und Kohlenmonoxid (CO)) stark in die Luftchemie eingreifen. Die Stick-oxide sind darüber hinaus auch eine Ursache der Waldschäden. Ebenfalls zu regeln sind daher in erster Linie Methan, Stickoxide, Kohlenmonoxid und Nicht-methan-Kohlenwasserstoffe.

Die Verhandlungen über das Protokoll sollten zum Ziel haben, Regelungsmaßnahmen über

- globale Reduktionsziele,
- die Höhe und Verteilung der Reduktionspflichten auf Seiten der Industrieländer,
- die Höhe und Verteilung der Ausbauoptionen für die Entwicklungsländer,
- den Stichtag zur Bemessung der Reduktion und
- die Berechnung der Grundlage für eine Rege-lung

zu liefern.

Auch sollten Grundsätze für die Verifikation der zu vereinbarenden Reduktionspflichten benannt wer-den. Hierzu zählen

- Methoden und Verfahren der Datenerhebung,

- Kontrollmechanismen,
- Reduktionsinstrumente und die
- Aufstellung der notwendigen Statistiken.

#### 4.1.1 Globale Reduktionsziele für die Jahre 2005, 2020 und 2050

In Zentrum der Verhandlungen über das Spurengas-Protokoll wird die Frage stehen, welche globalen Reduktionsziele als Grundlage für alle weiteren Vereinbarungen angestrebt werden sollen. Die möglichst schnelle Einigung über diesen Punkt ist unabdingbar notwendig, da sich aus ihm alle weiteren Überlegungen, etwa zur Verteilungsproblematik oder den Kosten der Reduktion, ableiten.

Die Enquete-Kommission schlägt hierzu einen Drei-Stufen-Plan vor, der Reduktionsziele vorgibt, die bis zum Jahr 2005, 2020 und 2050 erfüllt sein sollen.

Die im folgenden genannten Vorgaben sind für alle Beteiligten nur unter schwersten Anstrengungen erreichbar. Im Kern geht es darum, daß die Industrieländer als langjährige Hauptemittenten, woran sich auch in naher Zukunft nichts ändern wird, Reduktionspflichten übernehmen, deren Einhaltung ihnen massive Veränderungen ihrer Energiepolitik abverlangen. Dieses ist notwendig, um

- zum einen den zusätzlichen Treibhauseffekt einzudämmen, soweit er durch energiebedingte klimarelevante Spurengasemissionen ausgelöst wird,
- zum anderen den legitimen Entwicklungsstrategien einzelner Länder Rechnung zu tragen.

Auf der Basis des derzeit weltweit vorhandenen wissenschaftlichen Sachstandes empfiehlt die Kommission, die Kohlendioxid-Emissionen aus dem Energiebereich bis zum Jahr 2050 weltweit um mindestens 50 Prozent zu reduzieren. Bezogen auf den Stand des Jahres 1987 mit rund 20,5 Milliarden Tonnen entspricht dies einer absoluten Reduktion um 10,25 Milliarden Tonnen CO<sub>2</sub>. Dabei sind die Reduktionsan-

teile der verschiedenen Länder nach einem Schlüssel zu regeln, der alle relevanten Kriterien berücksichtigt (vgl. hierzu Nr. 4.1.2).

Eine Reduktion um 50 Prozent weltweit bis zum Jahr 2050 bedeutet, insbesondere unter Berücksichtigung der Belange der Entwicklungsländer, daß die weltweiten CO<sub>2</sub>-Emissionen bis zum Jahr 2020 um mindestens rund 15 Prozent, bezogen auf das Basisjahr 1987, vermindert werden müssen. Bei Umsetzung dieser Reduktionsziele werden im Jahr 2050 weltweit rund 10 Milliarden Tonnen CO<sub>2</sub> aus dem Energiebereich emittiert. Die Pro-Kopf-Emissionen werden dann im weltweiten Durchschnitt bei einer angenommenen Bevölkerungszahl von 10 Milliarden Menschen etwa 1 Tonne CO<sub>2</sub> betragen.

Die Kommission erachtet diese ehrgeizigen Reduktionsziele für notwendig und fordert die Bundesregierung auf, mit allem Nachdruck an die internationale Staatengemeinschaft zu appellieren, tiefgreifende Maßnahmen und Anstrengungen zu unternehmen, damit diese langfristigen Reduktionsziele erreicht und eingehalten werden können.

Damit diese Ziele bis zum Jahr 2050 beziehungsweise 2020 verwirklicht werden können, empfiehlt die Kommission, bis zum Jahr 2005 – bezogen auf das Jahr 1987 – folgende Reduktionsziele (vgl. Abb. 1 und Tab. 1):

- eine Verminderung der CO<sub>2</sub>-Emissionen in den wirtschaftsstarke westlichen Industrieländern mit derzeit besonders hohen Pro-Kopf-Emissionen um mindestens 30 Prozent;
- eine Verminderung der CO<sub>2</sub>-Emissionen in der EG um insgesamt mindestens 20 bis 25 Prozent;
- eine Verminderung der CO<sub>2</sub>-Emissionen in den Industrieländern (westliche und östliche Industrieländer zusammen) um mindestens 20 Prozent;
- den Anstieg der CO<sub>2</sub>-Emissionen auf etwa 50 Prozent in den Entwicklungsländern einzugrenzen, das heißt, die jährlichen Wachstumsraten der Emissionen zu vermindern, wobei eine Ermittlung differenzierter Werte für die einzelnen Entwicklungsländer erfolgen muß.

Tabelle 1

#### Reduktionsziele der Enquete-Kommission zur Verminderung der energiebedingten CO<sub>2</sub>-Emissionen bis zu den Jahren 2005 und 2050. (Angaben in Prozent, bezogen auf die Emissionen der jeweiligen Ländergruppen im Jahr 1987)

Ländergruppen	Reduktionsziele, in %, bezogen auf die jeweiligen Emissionen des Jahres 1987	
	bis 2005 mindestens	bis 2050 mindestens
Westliche und östliche Industrieländer insgesamt . . .	–20	–80
Wirtschaftsstarke westliche Industrieländer mit derzeit besonders hohen Pro-Kopf-Emissionen . . . .	–30	–80
Europäische Gemeinschaft . . . . .	–20 bis –25	–80
Entwicklungsländer . . . . .	+50	+70
Weltweit . . . . .	– 5	–50

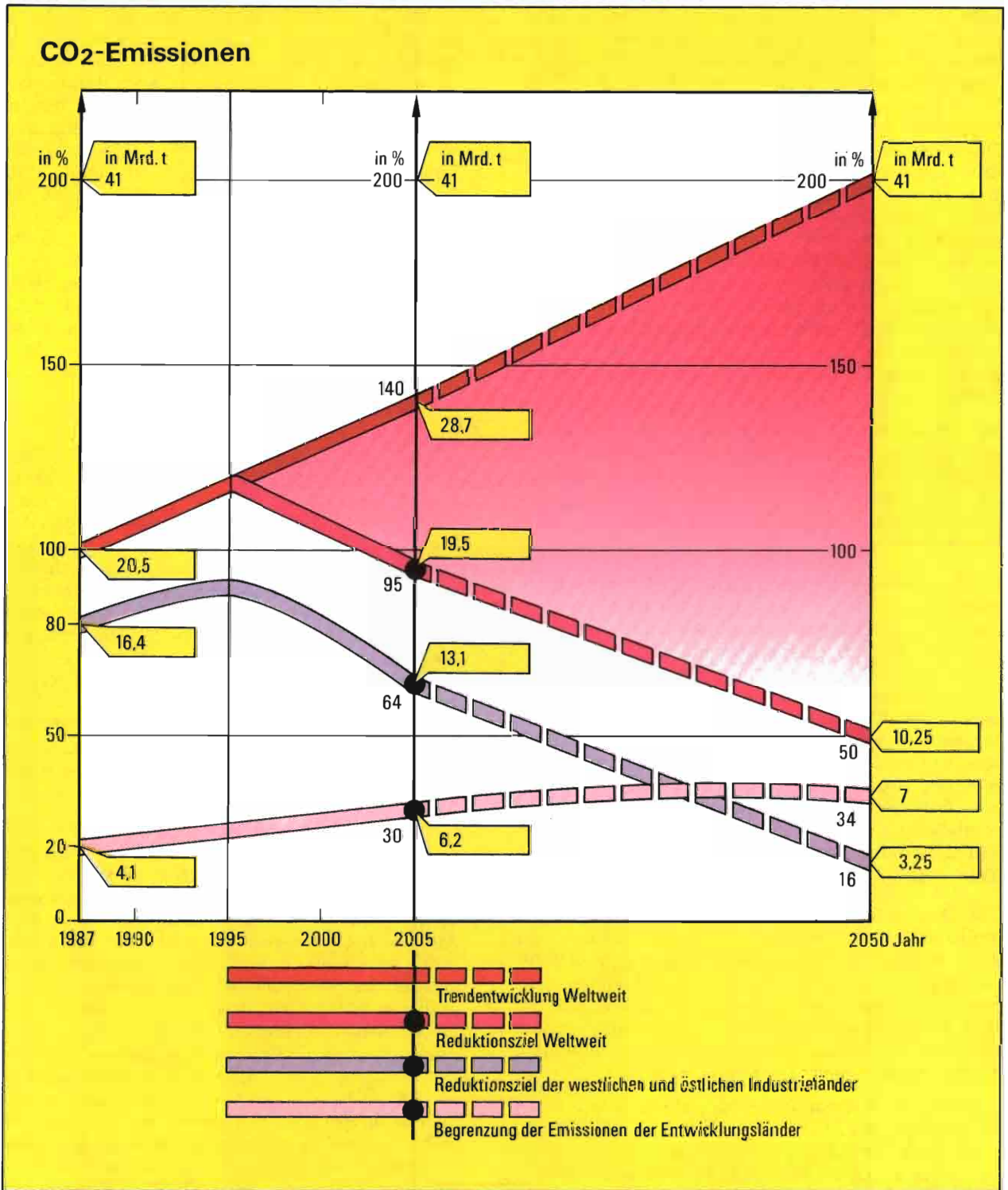


Abb. 1: Energiebedingte CO<sub>2</sub>-Emissionen bis zu den Jahren 2005 und 2050 nach dem Reduktionsplan der Enquete-Kommission: Reduktionsziele für die Industrieländer und Ziele für die Begrenzung der Zuwächse von Emissionen aus den Entwicklungsländern (vgl. Tab. 1).

Alle Angaben in Milliarden Tonnen und in Prozent, bezogen auf die Gesamtemissionen von rund 20,5 Milliarden im Basisjahr 1987. Die eingezeichneten Kurven sind nicht als exakte Vorgaben im Sinne von Szenario-Rechnungen zu verstehen, sondern dienen der Illustration möglicher Verläufe, um zu den anvisierten Zielen zu gelangen. Die Zuordnung der weltweiten CO<sub>2</sub>-Emissionen auf die Ländergruppen der Industrieländer (rund 80 Prozent Anteil im Jahr 1987) und der Entwicklungsländer (rund 20 Prozent im Jahr 1987) erfolgte überschlägig, eine differenzierte Aufteilung ist im Rahmen der Verhandlungen über die Internationale Konvention über Klima und Energie in den Anhängen über Geber- und Nehmerländer festzulegen (vgl. Nr. 3, Artikel I „Begriffsbestimmungen“).

Eine weitere Konkretisierung dieser Zielvorgaben, das heißt der exakten Reduktionsanteile der verschiedenen Länder und Ländergruppen auf der Basis eines Kriterienmixes mit entsprechender Gewichtung (vgl. Nr. 4.1.2), erscheint gegenwärtig infolge fehlender fundierter Potentialabschätzungen nicht möglich. Deswegen ist es aus Sicht der Enquete-Kommission dringend erforderlich, daß bis zur UN-Konferenz über Umwelt und Entwicklung 1992 in Brasilien von möglichst vielen Ländern an den obigen Zielvorgaben orientierte erste Potentialabschätzungen vorgelegt werden. Insbesondere sind auch Datenerhebungen in den Entwicklungsländern erforderlich, damit die für diese Länder festzulegenden Werte sich an den umweltpolitischen Notwendigkeiten orientieren und auf der Basis von durchzuführenden Potentialabschätzungen weiter differenziert und konkretisiert werden können.

Vor diesem Hintergrund ergeben die genannten Reduktionsziele zusammen eine Verminderung der weltweiten CO<sub>2</sub>-Emissionen um mindestens 5 Prozent bis zum Jahr 2005, bezogen auf das Jahr 1987, und – geschätzt – um mindestens 12 Prozent gegenüber den Emissionen des Jahres 1990.

Die Kommission empfiehlt ferner im Rahmen dieser Reduktionspläne, die Emissionen der weiteren energiebedingten klimarelevanten Spurengase, insbesondere des Methans, der Stickoxide, des Kohlenmonoxids und der Nichtmethan-flüchtigen organischen Verbindungen um wesentlich höhere, noch im einzelnen zu bestimmende Prozentsätze zu reduzieren. Die Emissionen sind nicht nur bei der Verbrennung der fossilen Energieträger Kohle, Erdöl und Erdgas zu vermindern, sondern auch in den vorgelagerten Prozessen, insbesondere die Methan-Emissionen aus dem Kohlebergbau (Grubengas), der Erdölförderung, der Erdgasförderung und den Leckageverlusten beim Transport und bei der Verteilung von Erdgas.

Eine Reduktion der CO<sub>2</sub>-Emissionen um 5 Prozent weltweit bis zum Jahr 2005, bezogen auf das Jahr 1987, erscheint in Anbetracht der bisher in der öffentlichen Diskussion ohne konkrete Grundlagenberechnungen proklamierten Zielsetzungen als relativ gering, bedeutet aber bei genauerer Betrachtung der Sachlage bisher kaum vorstellbare Anstrengungen. Einige Aspekte mögen dies verdeutlichen:

- Aufgrund der vorhandenen Datenlage wurde als Basisjahr das Jahr 1987 gewählt. Inzwischen sind im Zeitraum von 1987 bis 1990 der weltweite Energieverbrauch um etwa acht Prozent und die CO<sub>2</sub>-Emissionen um etwa sieben Prozent angestiegen, so daß die CO<sub>2</sub>-Emissionen von 1990 bis 2005 bereits um etwa 12 Prozentpunkte reduziert werden müssen, um zu dem Wert der absoluten CO<sub>2</sub>-Emissionen bis zum Jahr 2005 zu gelangen, der einer Reduktion um 5 Prozent gegenüber dem Jahr 1987 entspricht (vgl. Abb. 1).
- Die Komplexität der Sachlage erfordert außergewöhnliche Anstrengungen und einen breiten internationalen Konsens über die Bedeutung der zu leistenden Aufgabe, wenn bis zum Jahr 1992 eine Internationale Konvention über Klima und Energie und spätestens bis zum Jahr 1994 entsprechende

Protokolle verabschiedet und alle diese Abkommen bis spätestens 1995 in Kraft getreten sein sollen. Bis dahin werden aber aller Voraussicht nach die weltweiten CO<sub>2</sub>-Emissionen weiterhin ansteigen, auch wenn von einzelnen Ländern bereits erste Maßnahmen zur CO<sub>2</sub>-Reduktion ergriffen werden und so bereits eine leichte Absenkung der Trendentwicklung erreicht werden könnte. Für den Fall, daß die CO<sub>2</sub>-Emissionen von 1990 bis zum Inkrafttreten der internationalen Vereinbarungen im Jahr 1995 um weitere 10 Prozentpunkte ansteigen, müssen von 1995 bis 2005 die CO<sub>2</sub>-Emissionen um etwa 22 Prozentpunkte weltweit reduziert werden. Diese 22 Prozentpunkte Reduktion von 1995 bis 2005 entsprechen etwa der Reduktion um 5 Prozentpunkte von 1987 bis 2005 (vgl. Abb. 1).

- In den vergangenen zwei Jahrzehnten stieg der weltweite Energieeinsatz jährlich im Durchschnitt um etwa 2 Prozent an. Dabei lag der jährliche Zuwachs in den späten achtziger Jahren höher als in diesem Durchschnitt; im Jahr 1989 betrug er nach vorläufigen Angaben rund 3,5 Prozent. Wenn der Trend des Energieverbrauchs der vergangenen beiden Jahrzehnte sich fortsetzen würde, erhöhen sich gemäß den im Studienprogramm untersuchten Energieszenarien die weltweiten CO<sub>2</sub>-Emissionen aus dem Energiebereich von 1987 bis zum Jahr 2005 um etwa 40 Prozent. Bei Umsetzung der genannten Zielvorgaben würden die weltweiten energiebedingten CO<sub>2</sub>-Emissionen des Jahres 2005 bei rund 95 Prozent des Wertes von 1987 liegen. Bei einer Trendentwicklung ohne spezifische Maßnahmen wäre hingegen ein Anstieg auf 140 Prozent zu erwarten.
- Mögliche Aufteilungen der Reduktionsanteile für die Industrieländer einerseits und mögliche Begrenzungen der Zuwächse für die Entwicklungsländer andererseits sind in Abb. 2 graphisch wiedergegeben. Der Graphik ist beispielsweise zu entnehmen, daß eine weltweite Reduktion um 5 Prozent (obere Gerade) erreicht werden kann, wenn (ausgefüllter Kreis) die Industrieländer (westliche und östliche Industrieländer zusammen) ihre CO<sub>2</sub>-Emissionen auf 80 Prozent, also um 20 Prozent verringern, wobei die Entwicklungsländer das 1,5fache emittieren, also einen Anstieg ihrer Emissionen um 50 Prozent zulassen können. Dies muß vor folgendem Hintergrund gesehen werden. Es ist mit Sicherheit davon auszugehen, daß die Entwicklungsländer im Zuge ihrer wirtschaftlichen Entwicklungsanstrengungen und einer wachsenden Bevölkerung in der Zukunft einen steigenden Energiebedarf und steigende Emissionen haben werden. Aus diesen Gründen scheint es aus heutiger Sicht völlig unrealistisch, in naher Zukunft den Entwicklungsländern Reduktionen der absoluten CO<sub>2</sub>-Emissionen abzuverlangen. Dennoch sollten die Entwicklungsländer Bereitschaft zeigen, ihren Emissionsanstieg so weit wie möglich in Grenzen zu halten. Hierzu ist der Aufbau einer effizienten Energieversorgung mit möglichst geringen Emissionen durch entsprechenden Technologietransfer der Industrieländer und durch eine bedarfsgerechte Technologieentwicklung auf Seiten der



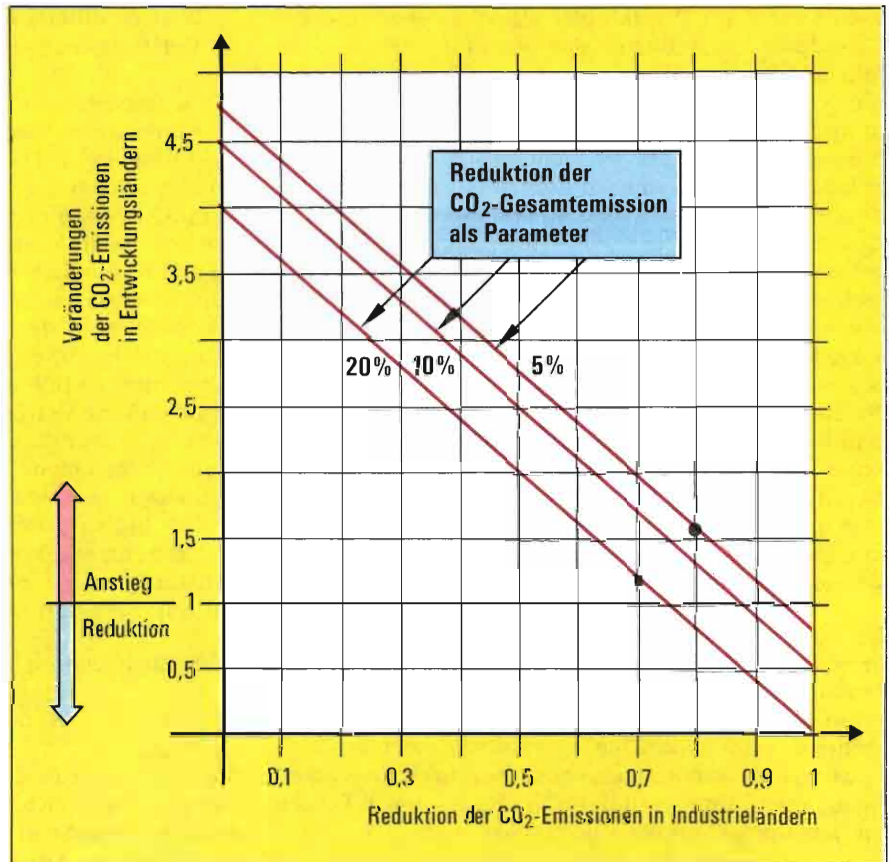


Abb. 2: Relative Veränderungen der energiebedingten CO<sub>2</sub>-Emissionen und mögliche Aufteilung der Reduktionsanteile für Industrieländer (westliche und östliche Industrieländer zusammen) und Entwicklungsländer (einschließlich Volksrepublik China) für angenommene weltweite Reduktionsziele von 5 Prozent, 10 Prozent und 20 Prozent bis zum Jahr 2005, bezogen auf das Jahr 1987 mit dem Wert 1.

Der Graphik liegt ein CO<sub>2</sub>-Emissionsanteil der Industrieländer im Jahr 1987 von 80 Prozent und ein Anteil der Entwicklungsländer von 20 Prozent zugrunde. Dargestellt sind drei Geraden, deren Parameter die weltweiten Reduktionsziele sind, von oben nach unten 5 Prozent, 10 Prozent und 20 Prozent CO<sub>2</sub>-Reduktion. Auf der Abszisse aufgetragen ist der relative CO<sub>2</sub>-Emissionsanteil der Industrieländer, auf der Ordinate derjenige der Entwicklungsländer (8).

Endenergieverbraucher in den Entwicklungsländern Grundbedingung.

Auch die Zielvorgabe der Toronto-Konferenz im Jahr 1988 läßt sich illustrieren: Eine weltweite CO<sub>2</sub>-Reduktion um 20 Prozent gegenüber 1987 (untere Gerade in Abb. 2) ließe sich erreichen durch (ausgefülltes Quadrat) eine Reduktion der Industrieländer zusammen um 30 auf 70 Prozent der Emissionen, wobei die Emissionen der Entwicklungsländer allerdings nur auf das 1,2fache, also um 20 Prozent, ansteigen könnten. Diese Aussagen sind jeweils bezogen auf das Basisjahr 1987. Wegen des seither bereits erfolgten Zuwachses würde dies bedeuten, daß die Entwicklungsländer zukünftig so gut wie keinen Anstieg der Emissionen mehr zulassen dürften und daß die CO<sub>2</sub>-Emissionen wirtschaftsstarker Industrieländer von 1987 bis 2005 um mindestens 40 Prozent gesenkt werden müßten. Die Empfehlung von Toronto aus dem Jahre 1988, die energiebedingten CO<sub>2</sub>-Emissionen bis zum Jahr 2005 um weltweit 20 Prozent zu reduzieren, wären daher im Hinblick auf den Schutz der Erdatmosphäre zwar wünschenswert, ist aber aus Sicht der Kommission nicht erreichbar.

#### 4.1.2 Zur Höhe und Verteilung der Reduktionspflichten für die Industrieländer

Zu den konfliktreichsten Punkten in den Verhandlungen um den Abschluß eines internationalen Übereinkommens und seiner Protokolle wird nach einer Einigung über das globale Reduktionsziel die länderspezifische Verteilung der Reduktionspflichten gehören.

Die Kommission will den internationalen Verhandlungen über die regionale und nationale Aufteilung der Reduktionspflichten nicht vorgreifen. Die genannten Eckwerte zur Aufteilung der Reduktionen auf die verschiedenen Länder und Ländergruppen sowie mögliche Verläufe der Reduktionen sind daher nicht als Vorgaben für die Verteilung der Reduktionspflichten zu verstehen, sondern als Überschlagsrechnung zur Verdeutlichung der auf die einzelnen Länder zukommenden Größenordnung der notwendig werdenden Reduktionen beziehungsweise Begrenzungen des Anstiegs.

Wie eingangs dargestellt wurde, sind in den Bemühungen zur Vorsorge vor Klimaveränderungen eine

Reihe wichtiger Politikfelder einzubeziehen, die die Grundpfeiler staatlicher Souveränität berühren. Es fällt schwer anzunehmen, daß in Belangen der Energie- oder Landwirtschaftspolitik von den Verhandlungspartnern das einzelstaatliche Wohl nicht höher eingeschätzt wird als das gemeinsame Interesse am Schutz der Erdatmosphäre. Von hoher politischer Bedeutung ist in diesem Zusammenhang die Frage der Kostenbelastung durch eine Umstellung für die einzelnen Volkswirtschaften. In dem Ausmaß, in dem sich einzelne notwendige Maßnahmen als kostengünstig erweisen, werden sich die zu erwartenden Verteilungskonflikte entschärfen. Auch aus dieser Sichtweise heraus ist eine Schrittmacherrolle einzelner Staaten zu begrüßen. Zudem wird eine Gleichbehandlung der Industriestaaten unter diesen kaum ohne Zugrundelegung näher zu bestimmender Kriterien akzeptiert werden. Die Erfahrungen mit den jahrelangen Verhandlungen über die Verabschiedung der EG-Großfeuerungsanlagen-Richtlinie mögen als Beispiel dienen (9).

Im Vorfeld der Verhandlungen über das Spurengas-Protokoll, daß die Verteilung von Reduzierungspflichten zu regeln hat, muß daher offenkundig eine Einigung über Verteilungsmechanismen erfolgen. Nachstehend werden verschiedene Kriterien mit der Zielsetzung untersucht, zu einer auf die einzelnen Staaten bezogenen Primärverteilung der Reduktionspflichten zu gelangen. Denkbar sind die Kriterien

- Höhe der Pro-Kopf-Emissionen,
- wirtschaftliche Leistungskraft,
- Energieintensität,
- bestehende Energieträgerstruktur,
- Ausfuhr-/Einfuhrbilanz energieintensiver Produkte und Verfahren,
- Einfluß des Klimas auf den Energieverbrauch,
- Zugehörigkeit zu einer Ländergruppe,
- Bevölkerungsentwicklung,
- Einfluß großer Migrationen, insbesondere Flüchtlingsströme,
- kumulierte Emissionen,
- Emissionen pro Landfläche,
- zu erwartendes Ausmaß der regionalen Folgen des zusätzlichen Treibhauseffektes.

Die Kommission geht davon aus, daß nur eine Kombination dieser — und eventuell weiterer — Kriterien eine gerechte Verteilung der Reduktionspflichten gewährleisten kann. Die folgenden Erläuterungen sind daher nicht als Festlegung auf ein bestimmtes Kriterium zu verstehen. Vielmehr sollten die Kriterien in einen Mix eingebunden werden. Über die Gewichtung der Kriterien und die Art und Weise, wie sie im Kriterienmix berücksichtigt werden sollen, macht die Kommission zum gegenwärtigen Zeitpunkt keine Angaben. Eine Festlegung sollte im Zuge internationaler Verhandlungen bis spätestens 1992 erfolgen. Die folgenden Ausführungen können dabei die Grundlage bilden.

#### — **Wirtschaftliche Leistungskraft der Vertragsparteien**

Die wirtschaftliche Leistungskraft eines Staates wird im allgemeinen durch das Kriterium „Bruttosozialprodukt (BSP) in US-Dollar pro Einwohner“ ausgedrückt. Trotz vorliegender Abschätzungen ist ein Vergleich der BSP-Messungen im Weltmaßstab nicht unproblematisch, da die Wirtschaftsstrukturen der Staaten völlig unterschiedlich sind und die Wechselkursschwankungen berücksichtigt werden müssen. Ferner ist auf die Bedeutung der Schattenwirtschaft hinzuweisen. Es gibt daher in der Literatur eine Debatte über das ausgewiesene BSP und das „reale“ BSP (10). Deutlich wird, daß im Vergleich von westeuropäischen Ländern mit Staatshandels- und Entwicklungsländern große Unterschiede auftreten. Ferner sollte nicht vernachlässigt werden, daß die Aussagefähigkeit des BSP als Indikator der wirtschaftlichen Leistungsfähigkeit zunehmend kritisch diskutiert wird und daß gegenwärtig an einer um die sozialen Kosten bereinigten BSP-Messung gearbeitet wird.

Schließlich weisen einige OPEC-Staaten ein hohes BSP pro Kopf auf. Infolge des zu erwartenden Nachfragerückganges nach fossilen Energieträgern bei Maßnahmen zur Eindämmung des zusätzlichen Treibhauseffektes dürfte ihre Bereitschaft zur Beteiligung an einer Konvention durch dieses Kriterium kaum gefördert werden. Unter Berücksichtigung dieser Einwände ist dieses Kriterium für eine Differenzierung der Reduktionspflichten innerhalb von Ländergruppen sinnvoll.

#### — **Energieintensität**

Unter der Energieintensität versteht man die benötigte Menge Energie zur Erzeugung einer Einheit BSP; sie wird in „Primärenergieverbrauch in Joule bezogen auf das BSP in US-Dollar“ ausgedrückt. Die Anmerkungen zur BSP-Berechnung treffen deshalb auch auf dieses Kriterium zu. Zusätzliches Handicap für einen Nord-Süd-Vergleich ist die Tatsache, daß die Energieintensität in Entwicklungsländern im Durchschnitt sehr hoch ist. Dieses Kriterium bietet sich insbesondere als Grundlage für eine weitere Differenzierung innerhalb von Ländergruppen an.

#### — **Bestehende Energieträgerstruktur**

Die Verhandlungspositionen einzelner Länder, insbesondere ihre Bereitschaft, sich auf bestimmte Reduktionsziele festzulegen, wird dadurch mitbestimmt werden, welche Energieträger gegenwärtig mit welchen Anteilen zum nationalen Energieeinsatz beitragen und über welche einheimischen Vorräte an Primärenergieressourcen die einzelnen Länder verfügen. Je nach Ausgangslage werden ganz unterschiedliche Spielräume beziehungsweise Belastungen entstehen. Die bestehende Energieträgerstruktur sollte daher als ein weiteres Kriterium im Zuge der Festlegung von Reduktionspflichten berücksichtigt werden.

### – **Ausfuhr-/Einfuhrbilanz energieintensiver Produkte und Verfahren**

Dieses Kriterium würde dem Umstand Rechnung tragen, daß bestimmte Länder einen Großteil der von ihnen benötigten Produkte und Verfahren nicht selbst produzieren, sondern aus dem Ausland importieren. Würde dieses bei der Festlegung und Verteilung von Reduktionspflichten nicht berücksichtigt, so würden die Staaten bevorzugt, die eine teilweise Auslagerung der Produktion energieintensiver Güter in andere Länder vorgenommen haben oder vornehmen wollen.

Über die Erstellung einer Ausfuhr-/Einfuhrbilanz für energieintensive Produkte und Verfahren kann in diesen Fällen sichergestellt werden, daß die Produzenten, die über den nationalen Bedarf hinaus energieintensive Produkte exportieren, nicht für ihre Dienstleistungsfunktion gegenüber anderen Ländern bestraft werden.

### – **Zugehörigkeit zu einer Ländergruppe**

Die Zugehörigkeit zu einer bestimmten Ländergruppe bietet die Möglichkeit, politisch motivierte Verteilungskriterien als Verhandlungsmasse zwischen einzelnen Ländergruppen zu schaffen. Denkbar wäre das folgende Punkteverfahren (11):

- westl. Industriestaaten (USA, Westeuropa Japan und Australien/Neuseeland): + 6
- Osteuropa und UdSSR: + 3
- Staatshandelsländer in Südostasien, insbesondere Volksrepublik China: – 2
- Schwellenländer, vor allem Argentinien, Brasilien, Chile, Mexiko, Venezuela, Indien, Südkorea, Taiwan, Hongkong und Singapur sowie verschiedene arabische OPEC-Mitglieder: – 2
- übrige Entwicklungsländer: – 4

Bei den Verhandlungen über die Verteilung von Reduktionspflichten würden positive Punkte als Lastschriften, negative Punkte als Gutschriften gewertet werden und in den zu vereinbarenden Kriterienmix eingehen. Eine Zuteilung zu einzelnen Ländergruppen ist allerdings problematisch, da sich Überschneidungen ergeben können. Objektive Punktezahlen lassen sich nur schwer ableiten, so daß dieses Kriterium eine reine Verhandlungsoption darstellt und nur in Verbindung mit anderen Kriterien zu verwenden ist.

### – **Pro-Kopf-Emissionen**

Das Kriterium der Pro-Kopf-Emissionen dürfte zu den wichtigsten Kriterien gehören. Der Gleichheitssatz ist von besonderer Bedeutung. Es ist leicht zu admini-

strieren, da sowohl über die Bevölkerungszahlen wie über die Emissionsmengen verhältnismäßig zuverlässige Daten vorliegen. Es spiegelt ferner das Wohlstands- und Effizienzniveau der einzelnen Volkswirtschaften wieder. Durch das Kriterium werden eine Reihe bedeutsamer Einflußfaktoren nicht berücksichtigt, zum Beispiel die tendenzielle Benachteiligung der osteuropäischen Länder – hier könnten gerade angesichts der sich abzeichnenden Ost-West-Entspannung Unterstützungsmechanismen entwickelt werden –, die jeweilige Verfügbarkeit von einheimischen Energieressourcen, der Energieverbrauch, der je nach Klima unterschiedlich hoch ausfällt (siehe unten) und der mögliche Anreiz zur Förderung des Bevölkerungswachstums (vgl. dazu das Kriterium „Bevölkerungsentwicklung“). Eine Begründung für die Verteilung von Reduktionspflichten allein auf der Grundlage dieses Kriteriums wäre daher nicht sinnvoll. Auch die Pro-Kopf-Emissionen sollten in einem Mix mit weiteren Kriterien berücksichtigt werden (vgl. Abb. 3).

### – **Einfluß des Klimas auf den Energieverbrauch**

Mit der Einführung dieses Kriteriums soll dem Umstand Rechnung getragen werden, daß die Vorbeziehungsweise Nachteile, die sich für einen Staat daraus ergeben, daß er den Wirkungen einer bestimmten Klimazone unterliegt, den Energieeinsatz erheblich beeinflussen. Dies betrifft zum Beispiel Größen wie den Heizwärmeenergiebedarf oder den Bedarf an Energie für Raumklimatisierung und Kälteverfahren.

### – **Bevölkerungsentwicklung**

Das Kriterium der Bevölkerungsentwicklung (13) soll den Energieprognosen dadurch Rechnung tragen, daß Staaten mit hohem Bevölkerungswachstum ein höherer Zuwachs an Emissionen zugestanden wird als solchen mit niedrigem Bevölkerungswachstum. Hier bestehen gravierende regionale Unterschiede (vgl. Tab. 2 und 3). Die langsam wachsenden Regionen haben eine durchschnittliche Wachstumsrate von 0,8 Prozent, die Spannweite liegt zwischen 0,2 Prozent in Westeuropa und einem Prozent in Ostasien. Von den Entwicklungsländern kann lediglich die Volksrepublik China zu der Gruppe der langsam wachsenden Regionen gezählt werden. Die Gruppe der schnell wachsenden Regionen hat eine durchschnittliche Wachstumsrate von 2,5 Prozent. Hier liegt die Spannweite von 2,2 Prozent in Südost-Asien bis zu 2,8 Prozent in Afrika. Surinam hat mit 4,3 Prozent zur Zeit neben Kenia mit 4,2 Prozent die weltweit höchste Wachstumsrate, die Bundesrepublik Deutschland (vor Beitritt der ehemaligen DDR) mit –0,2 die niedrigste (vgl. 2. Bericht, Abschnitt G, 5. Kapitel Nr. 3. Bevölkerungswachstum). Dieses Kriterium könnte daher durchaus in eine umfangreichere Bewertungsskala einfließen.

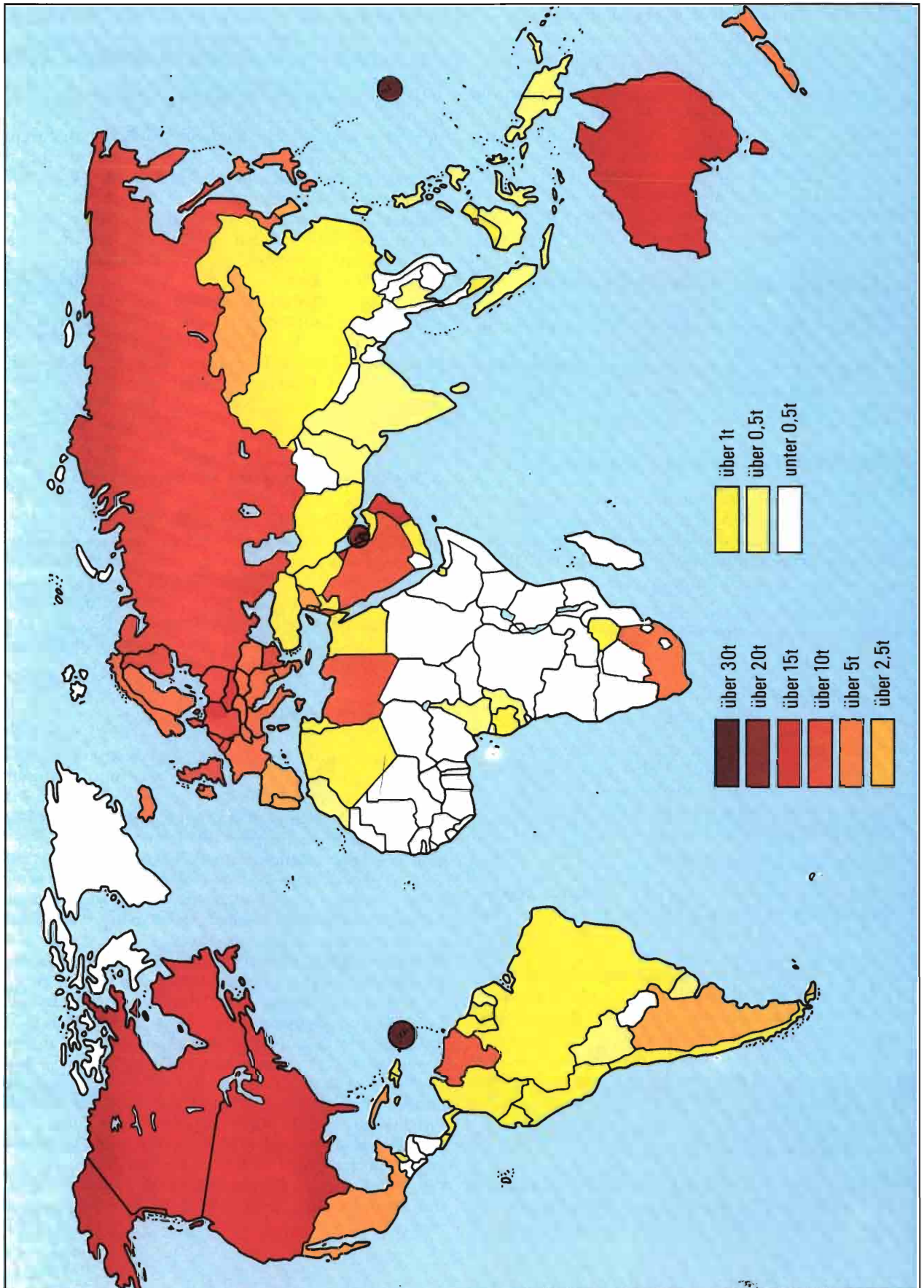


Abb. 3: Pro-Kopf-Emissionen einzelner Staaten in bezug auf die 1986 pro Einwohner im Energiesektor emittierten Tonnen Kohlendioxid (12)

Tabelle 2

## Weltbevölkerungswachstum nach Regionen 1986 (14)

Region	Bevölkerung (Mio.)	Wachstumsrate (in %)	jährlicher Zuwachs (Mio.)
<b>Regionen mit langsamem Wachstum</b>			
West-Europa .....	381	0,2	0,8
Nord-Amerika .....	267	0,7	1,9
Ost-Europa			
UdSSR .....	392	0,8	3,1
Australien/Neuseeland .....	19	0,8	0,1
Ost-Asien <sup>1)</sup> .....	1,263	1,0	12,6
<b>Gesamt</b> .....	<b>2,322</b>	<b>0,8</b>	<b>18,6</b>
<b>Regionen mit schnellem Wachstum</b>			
Südost-Asien <sup>2)</sup> .....	414	2,2	9,1
Lateinamerika .....	419	2,3	9,6
Indischer Subkontinent .....	1,027	2,4	24,6
Mittlerer Osten .....	178	2,8	5,0
Afrika .....	583	2,8	16,3
<b>Gesamt</b> .....	<b>2,621</b>	<b>2,5</b>	<b>65,5</b>

<sup>1)</sup> Japan und China

<sup>2)</sup> Philippinen, Thailand, Vietnam, Indonesien, Burma

Tabelle 3

## Prognostizierte Bevölkerungsgröße und Wachstumsraten (15)

Gebiet	Bevölkerung (Milliarden)			Jährliche Wachstumsrate (%)		
	1985	2000	2025	1950 zu 1985	1985 zu 2000	2000 zu 2025
Welt .....	4,8	6,1	8,2	1,9	1,6	1,2
Afrika .....	0,56	0,87	1,62	2,6	3,1	2,5
Lateinamerika .....	0,41	0,55	0,78	2,6	2,0	1,4
Asien .....	2,82	3,55	4,54	2,1	1,6	1,0
Nordamerika .....	0,26	0,30	0,35	1,3	0,8	0,6
Europa .....	0,49	0,51	0,52	0,7	0,3	0,1
UdSSR .....	0,28	0,31	0,37	1,3	0,8	0,6
Ozeanien .....	0,02	0,03	0,04	1,9	1,4	0,9

#### – Einfluß großer Migrationen, insbesondere Flüchtlingsströme

Aufgrund unterschiedlicher Ursachen und Wirkungszusammenhänge sind bereits heute in mehreren Ländern beziehungsweise Regionen nennenswerte Zuwanderungen aus Drittländern zu verzeichnen. Käme es dabei zu einer erheblichen absoluten Zunahme der Bevölkerungszahl, so wäre dies in der Regel mit einem

entsprechend höheren Energieeinsatz und erhöhten Emissionen verbunden. In Verpflichtungen über die Höhe und die Verteilung von Reduktionen muß diesem Umstand Rechnung getragen werden. Es soll damit verhindert werden, daß Länder, die zum Beispiel Flüchtlinge aus anderen Ländern in nennenswertem Umfang aufnehmen, aufgrund ihrer humanitären Haltung benachteiligt werden. Dieses Kriterium wird in Zukunft – gerade infolge von Klimaänderungen – an Relevanz gewinnen.

### – Kumulierte Emissionen

Das Kriterium der kumulierten Emissionen trägt der Tatsache Rechnung, daß wichtige klimarelevante Spurengase eine lange Verweilzeit in der Erdatmosphäre haben (anthropogen freigesetztes CO<sub>2</sub> zum Beispiel etwa 120 Jahre) und daß der zusätzliche Treibhauseffekt auf Jahrzehnte hinaus mithin weitgehend von den kumulierten Emissionen verursacht wird. Wer sich auf das Verursacherprinzip beruft, muß daher die kumulierten Emissionen mitberücksichtigen. Schwierigkeiten ergeben sich bei der Quantifizierung – ab wann sollen beispielsweise die kumulierten Emissionen geltend gemacht werden? Des weiteren ist der Einwand zu berücksichtigen, diese Regelung treffe Verursacher, denen ein Vorsatz kaum nachzuweisen ist. In der politischen Diskussion spielt dieses Kriterium im Rahmen des Nord-Süd Dialogs eine erhebliche Rolle. Wenn zum Beispiel (aus Gründen der statistischen Zuverlässigkeit) die kumulierten Emissionen für den Zeitraum 1950 bis 1986 mit den gegenwärtigen verglichen werden, ergibt sich ein Verhältnis zwischen Industriestaaten und Entwicklungsländern von 82 Prozent zu 18 Prozent (1950 bis 1986 kumuliert) und 74 Prozent zu 26 Prozent (1986). Die kumulierten Emissionen können darüber hinaus (zum Beispiel für den Zeitraum 1950 bis 1986) auf die durchschnittliche Bevölkerungszahl bezogen werden, um ein Kriterium für die historisch freigesetzten Emissionen pro Kopf zu definieren (16).

### – Emissionen pro Landfläche

Das Kriterium der Landfläche eines Staates kann höhere Transportkosten einer Volkswirtschaft oder die Fähigkeiten zum Anbau biotischer CO<sub>2</sub>-Senken berücksichtigen (17). Andererseits sind Zusammenhänge zwischen der Landfläche eines Staates und der Höhe der Treibhausgasemissionen nur sehr bedingt nachzuweisen, wie zum Beispiel ein Vergleich der USA, UdSSR, Brasiliens und Grönlands zeigt. Schließlich handelt es sich bei diesem Kriterium um eine kaum veränderbare Größe, die mit der Notwendigkeit einer dynamischen Verringerung der Treibhausgasemissionen innerhalb eines mehrstufigen Vertragswerkes kaum verknüpfbar ist. Für die Verteilung der Reduktionspflichten wird dieses Kriterium voraussichtlich weniger stark gewichtet werden.

### – Zu erwartendes Ausmaß der regionalen Folgen des zusätzlichen Treibhauseffektes

Das Kriterium der Betroffenheit kann möglicherweise eine zu entwickelnde integrierte Bewertungsskala erweitern (18). Die Folgen des zusätzlichen Treibhauseffektes werden bestimmte Länder und Regionen besonders stark schädigen, zum Beispiel die Länder und Inseln, die bereits bei einem Anstieg des Meeresspiegels um 30 bis 50 cm unbewohnbar werden, oder die Länder, deren Ernteerträge sich erheblich verschlechtern. Es ist zu prüfen, ob dieses Kriterium für die Aufteilung der Reduktionspflichten sinnvoll eingesetzt werden kann, oder ob es selbst für nach Verabschiedung einer internationalen Konvention ohne Zweifel noch notwendige Hilfsprogramme verwendet wird.

Nach Auffassung der Enquete-Kommission bietet es sich an, nach der Verhandlung über ein globales Reduktionsziel aus einer Kombination dieser und etwaiger anderer Kriterien eine integrierte Bewertungsskala auszuhandeln, aus der die einzelstaatlichen Reduktionsverpflichtungen errechnet werden können.

### 4.2 Internationaler Treuhandfonds zur Reduktion energiebedingter klimarelevanter Spurengasemissionen

Insgesamt kommt den Industrieländern eine Vorreiterfunktion zu, ihre Energiepolitik durch geeignete Maßnahmen zu ändern. Zusätzlich müssen aber Mechanismen zur Verbesserung des Technologietransfers und der Entwicklung bedarfsgerechter Technologien in den Entwicklungsländern geschaffen werden, damit gerade den Entwicklungsländern die jeweils umweltfreundlichste Technologie zur Verfügung steht.

Dies ist auch vor dem Hintergrund zu sehen, daß zur Finanzierung der Maßnahmen zur Reduktion energiebedingter klimarelevanter Spurengasemissionen, wie sie in der Konvention und im Spurengas-Protokoll vorgesehen werden, erhebliche finanzielle Aufwendungen erforderlich sind. Viele Staaten – insbesondere die Entwicklungsländer – werden allein aus eigener Kraft nicht dazu in der Lage sein, die zur Durchführung benötigten Mittel aufzubringen. Es empfiehlt sich daher, einen Internationalen Treuhandfonds zur Reduktion energiebedingter klimarelevanter Spurengasemissionen einzurichten. Die zu verabschiedende Internationale Konvention über Klima und Energie sollte die Grundsatzentscheidung für die Einrichtung des Fonds treffen. Seine Satzung, Finanzierung und institutionelle Ausgestaltung sollte ein Protokoll regeln. Dieses Treuhandfonds-Protokoll sollte möglichst zeitgleich mit dem Spurengas-Protokoll in Kraft treten.

Das Aufgabengebiet des Internationalen Treuhandfonds zur Reduktion energiebedingter klimarelevanter Spurengasemissionen und zur Förderung des Transfers umweltverträglicher Technologien sollte die Maßnahmen umfassen, die zur Reduzierung der Treibhausgasemissionen in den Unterzeichnerstaaten der Konvention notwendig sind, aber nicht aus eigenen Mitteln finanziert und nicht durch bilaterale Vereinbarungen abgedeckt werden können. Wichtigste Nehmer werden daher die Dritte-Welt-Staaten sein, die der Konvention beitreten.

Im einzelnen sollte der Treuhandfonds zur Reduktion energiebedingter klimarelevanter Spurengasemissionen

- umwelt- und sozialverträglichen Technologietransfer und die Entwicklung von bedarfsgerechten Technologien in den Entwicklungsländern unterstützen,
- die Reduktion von Emissionen energiebedingter klimarelevanter Spurengase fördern,
- die effiziente Nutzung von Energie sowie die Nutzung erneuerbarer Energien fördern,

- Forschung, Beobachtung und Öffentlichkeitsarbeit unterstützen.

Finanziert werden könnte der Treuhandfonds zur Reduktion klimarelevanter energiebedingter Spurengasemissionen durch

- freiwillige Beitragszahlungen oder
- Abgaben auf energiebedingte klimarelevante Spurengasemissionen.

Die Enquete-Kommission schlägt vor, den Fonds zunächst mit einem Mittelvolumen von 20 Milliarden DM aufzufüllen und gegebenenfalls zu einem späteren Zeitpunkt den Erfordernissen der Entwicklung anzupassen und auf ein sachlich gebotenes Maß anzuheben. Der Mittelumfang sollte dann im Rahmen regelmäßiger Überprüfungen den Erfordernissen der zum Erreichen der Reduktionsquoten und der Einhaltung der Ausbauoptionen notwendigen Maßnahmen angepaßt werden.

Die westlichen Industriestaaten werden dabei im wesentlichen die notwendigen Pflichtbeiträge zur Einzahlung in den Fonds aufzubringen haben. Ihnen kommt hier als hauptverantwortliche Verursacher von klimarelevanten Spurengasemissionen aus dem Energiesektor eine Vorreiterrolle zu.

## 5. Literaturverzeichnis

- (1) Vgl. Studienprogramm der EK, hier: E 3 a, S. 2; E 5, S. 40; E 8, S. 1 f. und E 10 a, S. 13. Vgl. zum Inhalt des Studienprogramms der EK im einzelnen: Abschnitt E, 6. Kapitel
- (2) Vgl. ebenda, hier: E 9 a, S. 56
- (3) Vgl. ebenda, hier E 6, S. 8 f
- (4) Vgl. ebenda, hier: E 5, S. 46
- (5) Vgl. ebenda, hier: E 6, S. 4
- (6) Vgl. ebenda, hier: E 6, S. 5; ähnlich: E 3 b, S. 31 f und E 3 a, S. 60
- (7) Vgl. ebenda, hier: E 4
- (8) Nach Umweltbundesamt 1990
- (9) Vgl. Studienprogramm der EK, hier: E.13
- (10) Vgl. Summers, R. und A. Heston: A new set of international comparisons of real product and price levels, estimated for 130 countries, 1950 — 1985, in: The review of income and wealth, Vol. 34 No. 1, 1988, S. 1-25

- (11) Vgl. Studienprogramm der EK, hier: E 13, S. 4 f
- (12) Die Abbildung basiert auf den in Tabelle 1 des 1. Kapitels von Abschnitt F genannten Daten.
- (13) Vgl. Studienprogramm der EK, hier: E 13
- (14) Entnommen aus: Karpe, H. J., Bevölkerungsentwicklung und Ressourcenerschöpfung, in: Deutsche Gesellschaft für die Vereinten Nationen (Hrsg.): Auswirkungen der Bevölkerungsentwicklung in den Ländern der Dritten Welt auf Ökologie und Ressourcen, 1989, S. 34
- (15) Entnommen aus: Welt-Kommission für Umwelt und Entwicklung: Unsere gemeinsame Zukunft, Greven 1987, S. 102 f.
- (16) Vgl. Krause u. a.: Energy Policy, 1989, S. I.5-13
- (17) Vgl. Westing, A. H.: A law of the Atmosphere, in: Environment, Vol. 31 No. 3, 1989
- (18) Vgl. Studienprogramm der EK, hier: E 13, S. 4 f.

## 6. Tabellenverzeichnis

- Tab. 1: Reduktionsziele der Enquete-Kommission zur Verminderung der energiebedingten CO<sub>2</sub>-Emissionen bis zu den Jahren 2005 und 2050
- Tab. 2: Weltbevölkerungswachstum nach Regionen im Jahr 1986
- Tab. 3: Prognostizierte Bevölkerungsgröße und Wachstumsraten

## 7. Abbildungsverzeichnis

- Abb. 1: Energiebedingte CO<sub>2</sub>-Emissionen bis zu den Jahren 2005 und 2050 nach dem Reduktionsplan der Enquete-Kommission: Reduktionsziele für die Industrieländer und Ziele für die Begrenzung der Zuwächse von Emissionen aus den Entwicklungsländern.
- Abb. 2: Relative Veränderungen der energiebedingten CO<sub>2</sub>-Emissionen und mögliche Aufteilung der Reduktionsanteile für Industrieländer (westliche und östliche Industrieländer zusammen) und Entwicklungsländer (einschließlich China) für angenommene weltweite Reduktionsziele von 5 Prozent, 10 Prozent und 20 Prozent bis zum Jahr 2005, bezogen auf das Jahr 1987 mit dem Wert 1.
- Abb. 3: Pro-Kopf-Emissionen einzelner Staaten in Bezug auf die 1986 pro Einwohner im Energiesektor emittierten Tonnen Kohlendioxid

## 3. KAPITEL

## Empfehlungen zur Implementation des Übereinkommens und der Protokolle

Basierend auf den bisherigen Ausführungen in den vorangegangenen Kapiteln werden im folgenden Empfehlungen für das weitere Vorgehen im Rahmen einer internationalen Strategie zur Reduktion energiebedingter klimarelevanter Spurengasemissionen unterbreitet.

### 1. Schrittmacherrolle verschiedener Industrienationen, insbesondere der Bundesrepublik Deutschland

Die Enquete-Kommission schlägt vor, daß sich einige Industrieländer massiv für die Aushandlung und Verabschiedung der Internationalen Konvention über Klima und Energie sowie der möglichen Protokolle einsetzen, wobei zunächst das Übereinkommen im Vordergrund stehen sollte. Bisher gewonnene Erfahrungen haben gezeigt, daß einzelne Staaten oder Regionen durch vorab ergriffene Maßnahmen ein international abgestimmtes Vorgehen stimulieren und gleichzeitig einen Beitrag zur Reduzierung ihrer Treibhausgasemissionen leisten können. Beispielsweise hat sich das Zusammenschließen in den „30 Prozent-Klubs“ als freiwillige Selbstverpflichtung zur Emissionsreduzierung im Rahmen der Genfer Luftreinhaltekonvention und den dazugehörigen Protokollen bewährt (1).

Für die Unterzeichnung und die Implementation des Übereinkommens ist zu untersuchen, welche Staaten welche Maßnahmen ergreifen sollten. Die ersten Maßnahmen sollten ohne weitere Verzögerung aus drei Gründen von den westlichen Industriestaaten ergriffen werden:

- In einigen Staaten hat die öffentliche und politische Diskussion einen Stand erreicht, der dazu führt, daß nationale Maßnahmen zur Eindämmung des zusätzlichen Treibhauseffektes bereits im Vorfeld einer internationalen Koordinierung als dringend notwendig angesehen werden.
- Was die Anreicherung von Treibhausgasen in der Atmosphäre betrifft, sind die westlichen Industriestaaten eindeutig in der Position der Verursacher.
- Die Fähigkeiten zur Initiierung und Gestaltung des Strukturwandels sind in technologischer sowie finanzieller Hinsicht in den westlichen Industriestaaten so ausgeprägt wie sonst nirgends auf der Welt.

Von hoher Bedeutung ist der Technologietransfer. Die genannten Länder und die Empfängerländer sollten über Anreize und freiwillige Verhaltensleitlinien vermeiden, daß Altanlagen ohne eine Nachbesserung im

Sinne klimaschützender Technologien exportiert werden. Dies könnte durch die Konditionen der Kreditvergabe (2) sowie über klimafreundliche Rahmenbedingungen in Empfängerländern (zum Beispiel angemessene Energiepreise) unterstützt werden. Bei Kraftwerken kann der Grad der Unterstützung vom Wirkungsgrad des Kraftwerkes abhängig gemacht werden.

Es wird empfohlen, den verbesserten Technologietransfer abzusichern. Dabei ist zu prüfen, inwieweit diese Aufgabe von der Deutschen Gesellschaft für technische Zusammenarbeit (GTZ) wahrgenommen werden könnte. Ferner sollte die Bundesrepublik in Drittländern stärker ausbauen und dabei einen Schwerpunkt auf die rationelle Energienutzung legen.

Um ihre Schrittmacherrolle für ein international koordiniertes Vorgehen zu unterstreichen, sollten die genannten Länder ein Reduktionsziel für ihre Treibhausgasemissionen nennen, das mit 30 bis 40 Prozent deutlich über die für alle Industrieländer genannte Größenordnung der Reduzierung der CO<sub>2</sub>-Emissionen um mindestens 20 Prozent bis 2005 hinausgeht.

Hinsichtlich der Rolle der Bundesrepublik Deutschland sei hier auf Abschnitt E, 1. Kapitel verwiesen.

### 2. Handlungsempfehlungen für die EG

Die EG ist für eine Politik zur Reduktion energiebedingter klimarelevanter Spurengasemissionen in zweifacher Hinsicht bedeutsam. Zum einen wird versucht, durch Übertragung eines Teiles der nationalen Souveränität zu gleichgerichtetem staatenübergreifendem Handeln bei grenzüberschreitenden Problemstrukturen zu gelangen. Zum anderen hat der Europäische Rat anlässlich des Gipfels in Dublin am 25. und 26. Juni 1990 erklärt, daß die EG und ihre Mitgliedstaaten im Umweltbereich bei der Förderung abgestimmter und wirkungsvoller Maßnahmen auf globaler Ebene, bei der Zusammenarbeit mit anderen Industriestaaten und bei der Unterstützung der Entwicklungsländer bei der Bewältigung ihrer besonderen Schwierigkeiten eine führende Rolle zu übernehmen habe (3).

Die Enquete-Kommission ersucht die Bundesregierung, darauf hinzuwirken, daß sich die EG noch im Jahr 1991 im Rahmen des EG-Abstimmungsprozesses auf gemeinsame und möglichst weitreichende Reduktionsziele verständigt.

Die Enquete-Kommission ersucht die Bundesregierung vor allem, darauf hinzuwirken, daß die EG, ausgehend von beispielhaftem Vorgehen ihrer Mitglied-



staaten, insgesamt eine Vorreiterrolle bei der Verminderung der energiebedingten klimarelevanten Spurengasemissionen einnimmt.

Für die Verringerung der Summe der Emissionen aus dem Gebiet der EG hält die Enquete-Kommission angesichts der gebotenen weltweiten Reduktionsziele folgenden Stufenplan, jeweils bezogen auf den Stand des Jahres 1987, für notwendig:

- Einfrieren der Emissionen bis spätestens zum Jahr 1995;
- Reduktion der Emissionen um mindestens 10 Prozent bis zum Jahr 2000;
- Reduktion der Emissionen bis zum Jahr 2005 um mindestens 20 bis 25 Prozent.

Dabei ist zu berücksichtigen, daß allein die Bundesrepublik Deutschland (mit ehemaligem Staatsgebiet der Deutschen Demokratischen Republik), die nach Auffassung der Enquete-Kommission ihre CO<sub>2</sub>-Emissionen um 30 Prozent reduzieren soll, mit ihrem Beitrag rund 10 Prozentpunkte des Reduktionsziels der EG für das Jahr 2005 erbringt.

Die Emission der weiteren energiebedingten klimarelevanten Spurengase, in erster Linie Stickoxide, Methan, Kohlenmonoxid und flüchtige organische Nichtmethan-Verbindungen, sind in einem weitergehenden, im einzelnen noch zu spezifizierenden Umfang zu vermindern.

Die EG sollte geeignete Maßnahmen zum Erreichen der Reduktionsziele spätestens im Jahr 1992 beschließen und einleiten sowie ihre an den langfristigen Reduktionen orientierte Energie- und Umweltpolitik alle zwei Jahre überprüfen und gegebenenfalls den Erfordernissen anpassen.

Im Hinblick auf die im Jahr 1992 zu verabschiedende Internationale Konvention über Klima und Energie sollte gleichzeitig eine gemeinsame Strategie der EG-Mitglieder erarbeitet werden, die auch die Rolle der EG im weltweiten Kontext beinhaltet.

Damit die für notwendige internationale Abstimmungsprozesse und den Abschluß von Vereinbarungen sehr kurze Zeitspanne eingehalten werden kann, ersucht die Enquete-Kommission die Bundesregierung, darauf hinzuwirken, daß die EG bereits bei ihrem nächsten Gipfel geeignete Maßnahmen in die Wege leitet.

Hierzu sind unter anderem Studien zu vergeben, die innerhalb eines Jahres im Hinblick auf die Verringerung der CO<sub>2</sub>-Emissionen um mindestens 20 bis 25 Prozent für die EG insgesamt bis zum Jahr 2005 sowie die Reduktion der weiteren energiebedingten klimarelevanten Spurengasemissionen in größerem, noch zu spezifizierendem Umfang

- so schnell wie möglich die technischen und wirtschaftlichen Reduktionsmöglichkeiten für alle Mitgliedsländer ermitteln;
- die geeignetsten Maßnahmen für gemeinsame EG-weite Reduktionsstrategien ermitteln;
- bis zum Wintergipfel 1991 unter Zugrundelegung des EG-Reduktionsziels von mindestens 20 bis 25 Prozent sowie der Vorgabe, daß wirtschaftsstarke

EG-Mitglieder 30 Prozent bis zum Jahr 2005 reduzieren, einen Kriterienmix mit entsprechender Gewichtung erarbeiten, auf dessen Grundlage eine länderspezifische Festlegung von Reduktionspflichten erfolgen kann. Denkbar wäre unter anderem die Einbeziehung folgender Kriterien:

- Höhe der Pro-Kopf-Emissionen,
- wirtschaftliche Leistungskraft,
- Energieintensität,
- bestehende Energieträgerstruktur,
- Ausfuhr-/Einfuhrbilanz energieintensiver Produkte und Verfahren,
- Zugehörigkeit zu einer Ländergruppe,
- Bevölkerungsentwicklung,
- Einfluß großer Flüchtlingsströme und Migrationen,
- Einfluß des Klimas auf den Energieverbrauch (Heizung, Kühlung),
- Emissionen pro Landfläche,
- kumulierte Emissionen,
- zu erwartendes Ausmaß der regionalen Folgen des zusätzlichen Treibhauseffektes.

Durch das vorgeschlagene Verfahren, das unter Zugrundelegung des EG-weiten Reduktionsziels und der Vorgabe, daß wirtschaftsstarke EG-Mitglieder mit besonders hohen Pro-Kopf-Emissionen mindestens 30 Prozent reduzieren müssen, zu unterschiedlichen Reduktionspflichten für die Mitgliedstaaten führen wird, wird eine den spezifischen Ausgangssituationen der Länder angepaßte annähernd gleich hohe Belastung erreicht. Eine Benachteiligung einzelner Länder wird weitestgehend ausgeschlossen.

Auf der Grundlage dieser Studien sollte die EG Vorschläge erarbeiten, um im Jahr 1992 für das EG-weite und das weltweite Vorgehen geeignete Maßnahmen auf fundierter Basis zu beschließen. Diese Vorschläge sollten ausdrücklich vorsehen, daß die Art und Weise, wie die einzelnen Mitgliedstaaten der EG ihre spezifische Reduktionsquote erfüllen, ihrer Wahl überlassen bleibt. Weiterhin sollten die Vorschläge beinhalten, daß die EG-Mitglieder sich untereinander insoweit beim Erreichen von länderspezifischen Reduktionszielen unterstützen, wie dies aus finanziellen und technologischen Erwägungen heraus dann begründet ist, wenn der Kriterienmix bestimmte länderspezifische Faktoren nicht ausreichend berücksichtigen konnte.

### 3. Handlungsempfehlungen für das internationale Vorgehen

Von entscheidender Bedeutung für die Eindämmung des zusätzlichen Treibhauseffektes wird es sein, ob die Vorleistungen und das beispielhafte Vorgehen, wie es die Kommission für einige Industrieländer und die EG empfiehlt, dazu führen werden, daß sich andere wichtige Emittenten von energiebedingten Spurengasen der internationalen Reduktionspolitik an-

schließen. Bei der Planung und Umsetzung der im weiteren vorgeschlagenen Maßnahmen sollte diese Prämisse stets mitbedacht werden.

Die Enquete-Kommission fordert die Bundesregierung auf, sich in den zuständigen Internationalen Regierungsorganisationen und in bilateralen Verhandlungen mit wichtigen CO<sub>2</sub>-Emittenten für den Abschluß und das schnellstmögliche Inkrafttreten der Internationalen Konvention über Klima und Energie einzusetzen. Die Bundesregierung sollte darauf hinwirken, daß die Konvention spätestens 1992 auf der UN-Konferenz über Umwelt und Entwicklung verabschiedet wird. Zu diesem Zweck sollte sie sich unter anderem auf der 2. Weltklimakonferenz in Genf dazu verpflichten, intensiv an der Vorbereitung der UN-Konferenz in Brasilien mitzuwirken und sich für die Anberaumung einer 1991 stattfindenden Vorbereitungskonferenz engagieren.

Die Bundesregierung sollte nach Auffassung der Enquete-Kommission auch dafür Sorge tragen, daß sehr frühzeitig Vorbereitungen getroffen werden, die es erlauben, spätestens im Jahr 1992 konkrete Verhandlungen über die Höhe, die Verteilung und die Verifikationsmechanismen von Reduktionspflichten im Rahmen eines Spurengas-Protokolls zu führen. Grundlage dieser Vorbereitungen sind die bereits im Rahmen der EG-Maßnahmenvorschläge angesprochene Ermittlung von nationalen Reduktionspotentialen und die Festlegung von Kriterien zur Verteilung der Reduktionspflichten.

Die Bundesregierung wird zur Vorbereitung der äußerst schwierigen Verhandlungen über Reduktionspflichten ersucht, in den Gremien der zuständigen Internationalen Regierungsorganisationen – etwa der Vereinten Nationen und der OECD – und auf dem Wege bilateraler Verhandlungen darauf hinzuwirken, daß jene Staaten, deren Mitwirkung für eine hinreichende Eindämmung des zusätzlichen Treibhauseffekts unverzichtbar ist, ihre national möglichen Reduktionspotentiale ermitteln beziehungsweise andere Staaten bei den entsprechenden Untersuchungen unterstützen. Die Kommission unterstützt in diesem Zusammenhang nachdrücklich die Initiative der Vereinten Nationen, mit der Volksrepublik China im Frühjahr 1991 eine internationale Arbeitstagung durchzuführen, die unter anderem der Ermittlung der Reduktionspotentiale in diesem wichtigen Land dienen soll. Ähnliche Arbeitstagungen sollten in Kooperation mit der UdSSR und mit Indien durchgeführt werden. Die Bundesregierung wird ersucht, die Vereinten Nationen bei der Vorbereitung der länderspezifischen Potentialstudien und den Konferenzen in diesen Ländern nachhaltig zu unterstützen.

#### 4. Literaturverzeichnis

- (1) Vgl. Studienprogramm der EK, hier: E 3a, S. 62; E 9a, S. 15
- (2) Vgl. ebenda, hier: E 7b, S. 31f.
- (3) Vgl. Presse- und Informationsamt der Bundesregierung (Hrsg.): Europäischer Rat in Dublin – Anlage II: Notwendigkeit des Schutzes der Umwelt (Bulletin Nr. 84), Bonn, den 30. Juni 1990, S. 725

### Zusatzvotum der Kommissionsmitglieder Müller (Düsseldorf), Prof. Dr. Bach, Prof. Dr. Dr. Crutzen, Frau Prof. Ganseforth, Prof. Dr. Graßl, Prof. Dr. Meyer-Abich, Frau Dr. Hartenstein, Prof. Dr. Hennicke, Dr. Kübler, Dr. Knabe zu Abschnitt F: Internationale Strategie zur Reduktion energiebedingter klimarelevanter Spurengasemissionen

#### 1. Die Teilung der Welt durch Teilen überwinden

In diesem Abschnitt entwickelt die Enquete-Kommission ‚Schutz der Erdatmosphäre‘ Grundlagen für eine globale Umweltpolitik zum Schutz des Klimas. Die Kommission ist sich bewußt, daß nur mit ‚Weltinnenpolitik‘ (C. F. von Weizsäcker) die Gefahr einer Klimaänderung in Grenzen gehalten werden kann. Von daher muß Umweltpolitik heute mehr denn je auch globale Zusammenhänge beachten. Auf dieser Ebene sind aber – mehr noch als im nationalen Rahmen – soziale Unterschiede und starke Wirtschaftsinteressen zu überwinden und kulturelle Differenzierungen zu beachten, um eine erfolgreiche Politik zum Schutz des Klimas einzuleiten.

Wirksame Vereinbarungen auf internationaler Ebene werden nur möglich sein, wenn sie diese unterschiedlichen sozialen und ökonomischen Ausgangsbedingungen beachten. Insbesondere muß berücksichtigt werden, daß heute die Lebenschancen zwischen den Menschen in den Industrieländern und Entwicklungsstaaten weit auseinanderklaffen. Im letzten Jahrzehnt hat sich die Spaltung zwischen dem wohlhabenden Norden und der überwiegenden Mehrheit der Menschen in den Staaten des Südens sogar weiter vertieft. Der Schutz der Erdatmosphäre kann nur erreicht werden, wenn die Interessen der Länder der Dritten Welt, die an der Ausarbeitung einer internationalen Vereinbarung von Anfang an beteiligt sind, ausreichend berücksichtigt werden.

Unter ökologischen Gesichtspunkten sind die Industriestaaten bankrott, sie haben ihren Wohlstand auch auf Kosten der Umwelt aufgebaut. Um eine Dauerhaftigkeit von Entwicklung zu erreichen, muß die Weltgesellschaft die Nutzung von Rohstoffen und Energie zum Schutz der natürlichen Lebensgrundlagen begrenzen. Dies kann nur erreicht werden, wenn die reichen Industrieländer die Fähigkeit entwickeln,

- die Teilung der Welt durch Teilen zu überwinden,
- die von ihnen dominierte Weltwirtschaft nach ökologischen Kriterien neu zu ordnen und
- den Ländern der Dritten Welt moderne, umweltverträglichere Technik zur Verfügung zu stellen.

#### 2. Die Bedeutung der Entwicklungsländer

Die Hauptverursacher des Treibhauseffekts sind die Industrieländer, von ihnen muß deshalb im Sinne einer Wiedergutmachung ein besonders hoher Beitrag bei der Reduktion klimarelevanter Spurengase verlangt werden. Während jedoch die Industrieländer ihre energiebedingten Treibhausgase möglicher-

weise begrenzen können, ist dies den Entwicklungsländern aus eigener Kraft nicht möglich. So besteht, wenn es nicht zu wirksamer Hilfe kommt, die Gefahr, daß in den nächsten Jahren ein wesentlicher Beitrag zur anthropogenen Veränderung des Treibhauseffektes auch von den Ländern der Dritten Welt kommt, bei denen die Dynamik im Zuwachs der Energienutzung stark zunimmt. Nach den gegenwärtigen Entwicklungstrends werden sich die energiebedingten Kohlendioxid-Emissionen aus den Entwicklungsländern von gegenwärtig ca. 4,0 Mrd. t auf 8,0 Mrd. t im Jahr 2005 verdoppeln. Wenn diese Länder im Rahmen ihrer nachholenden Entwicklung das energieintensive Wachstumsmodell der Industriestaaten übernehmen, ist das Erd-Ökosystems bereits in kurzer Zeit überfordert.

Die Weltklimakonferenz von Toronto hat eine Verringerung der Kohlendioxid-Emissionen um 50 Prozent bis zum Jahr 2050 vorgegeben. Bei einer gleichzeitig weiter ansteigenden Weltbevölkerung auf rund 10 Mrd. Menschen bedeutete die Verwirklichung dieser Zielsetzung, daß pro Kopf im Durchschnitt nur noch ca. 1 t Kohlendioxid emittiert werden darf. Deutschland (unter Einbeziehung der DDR) lag 1988 bei 13,7 t pro Kopf. Dieser Zahlenvergleich zeigt, welche gewaltigen Anstrengungen für den Schutz des Klimas gerade von den Industrieländern verlangt sind. Dies erfordert auch eine Neuorientierung im Verständnis von gesellschaftlicher Entwicklung, insbesondere einen neuen Begriff und die Umverteilung von Wohlstand und damit einen tiefgreifenden Wandlungsprozeß.

Umweltschutz, Schutz der Erdatmosphäre und dauerhafte Entwicklung sind nach Auffassung der Vereinten Nationen öffentliche Aufgaben ersten Ranges. Sie erfordern die Umgestaltung der nationalen und internationalen Rahmenbedingungen durch moderne ordnungsrechtliche Regelungen und ökonomische Anreizinstrumente. Allein der unmittelbare Finanzbedarf für dringend notwendige Umweltschutzinvestitionen in den Dritte-Welt-Ländern wird auf jährlich 20 bis 50 Mrd. US-Dollar veranschlagt (WRI, 1989). Schätzungen über den zusätzlichen Finanzbedarf für Schutz der Ozonschicht/FCKW-Verbot, Schutz der Tropenwälder, Aufbau einer umweltverträglichen Energieversorgung und ökologische Landwirtschaft liegen nicht einmal vor.

Eine faire und konstruktive Partnerschaft zwischen den Industriestaaten und den Entwicklungsländern muß sich aus der Sicht der o. g. Kommissionsmitglieder von folgenden Prinzipien leiten lassen:

- a) Eine erfolversprechende Partnerschaft setzt die ökologische Glaubwürdigkeit und Vorreiterrolle der Industrieländer voraus;
- b) Die weltwirtschaftlichen Rahmenbedingungen müssen auch nach ökologischen Zielsetzungen neu geordnet werden. Sie sind heute eine wesentliche Ursache der globalen Zuspitzung der Umweltprobleme. Eine derartige Neuordnung verlangt national eine ökologische Neuordnung von Wirtschaft und Gesellschaft. Ein wichtiger Ansatz hierfür ist die weitgehende Internalisierung der sozialen und ökologischen Folgekosten einzelwirtschaftlicher Entscheidungen.

- c) Die Nord-Süd-Wirtschaftsbeziehungen verschärfen die Übernutzung der Natur. Insbesondere in den stark verschuldeten Ländern nimmt die arbeitsbedingte Umweltzerstörung zu. Eine weltweite Politik zum Schutz des Klimas muß dieser Ausgangslage Rechnung tragen und soziale Veränderungen zur Sicherung und Verbesserung des Lebensunterhalts der Ärmsten in der Welt fördern.

Von daher ergeben sich folgende Forderungen für einen wirksamen Einsatz von Finanzmitteln für internationale Maßnahmen zum Schutz des Klimas

- freier, partnerschaftlicher Dialog über die zu erreichenden Ziele und die einzusetzenden Finanzmittel;
- ‚Partizipation aus Überzeugung‘, damit sich die Nehmerländer auch selbst mit den ökologischen Zielen identifizieren und sich für ihre Erreichung aktiv einsetzen;
- Bekämpfung der Armut und ihrer Ursachen.

Diese Empfehlungen gehen weit über den Handlungsrahmen heutiger Politik hinaus. Sie sind aber für eine wirksame Klimaschutzpolitik unverzichtbar.

### 3. Ökonomische Anreizinstrumente notwendig

Das konventionelle umwelt- und wirtschaftspolitische Instrumentarium ist nicht in der Lage, den notwendigen Umbau zur Rohstoff- und Energieeffizienz national, regional und global zu erreichen. Neben ordnungsrechtlichen (z. B. Umweltvölkerrecht) und organisatorischen (z. B. UN-Umweltrat) Rahmensetzungen sind auch ökonomische Anreizinstrumente notwendig, die schnell wirksam, leicht administrierbar und langfristig ausgerichtet sind.

Im Rahmen einer Klimakonvention können ökonomische Instrumente grundsätzlich in folgenden Bereichen eingesetzt werden:

- Handelssanktionen gegenüber Nichtunterzeichnerstaaten, bzw. bei Pflichtverletzungen einer Vertragspartei;
- Energieverbrauchsabgaben (Primärenergieabgabe) zur Finanzierung internationaler Programme.

Darüberhinaus sind weitere Einsatzmöglichkeiten (z. B. die Verteilung bestimmter Reduktionspflichten im Nord-Süd-Verhältnis) denkbar. Ökonomische Anreizinstrumente dürfen aber nicht losgelöst von den juristisch-institutionellen Rahmenbedingungen konzipiert werden und müssen soziale Auswirkungen berücksichtigen. Zudem ist es notwendig, die ökonomischen Anreize mit den ordnungsrechtlichen Instrumenten zu verzahnen.

### 4. Wirksame Sanktionsregelungen

Sanktionen fast ausschließlich für die Nehmerländer von Transferleistungen vorzusehen, entspricht nicht dem Gedanken einer fairen Partnerschaft zwischen

Nord und Süd. Vielmehr sollten Sanktionen bei der Haftung für die Verursachung des anthropogenen Treibhauseffektes ansetzen. Die Frage der Sanktionen ist somit eng mit der Frage nach einer möglichen Staatenhaftung verbunden. Auf der Ebene des Völkerrechts wird die Haftungsproblematik in der Regel aus rechtspolitischen Gründen, vor allem aber aus nationalen ökonomischen Interessen vernachlässigt.

In diesem Zusammenhang sind die Kodifikationsvorhaben der International Law Commission der Vereinten Nationen zur Staatenverantwortlichkeit von großer Bedeutung, die ein eigenständiges Haftungssystem für den Gesamtbereich des Völkerrechts festschreiben sollen. Hervorzuheben ist der Art. 19 Abs. 3 Ziffer d des ersten Teils des Entwurfes über die ‚State responsibility for international wrongful acts‘. Dieser behandelt den „schwerwiegenden Bruch einer Völkerrechtsverpflichtung, die dem Schutz und Erhalt der menschlichen Umwelt dient, wie z. B. das Verbot erheblicher Verschmutzung der Luft und der Meere“ und stuft diese als ‚international crime‘ ein. Eine solche Bestimmung könnte gerade für eine Konvention zum Schutz der Erdatmosphäre nutzbar gemacht werden.

Im Rahmen einer Klimakonvention ist ein Artikel zur Haftung wünschenswert, allerdings bestehen keine Zweifel, daß entsprechende Bestimmungen nur schwer durchsetzbar sind. Besondere Bedeutung kommt der Regelung von Verfahren zu, die eine Verletzung des Rechtsgutes Erdatmosphäre (Klima) bewerten und ahnden. Ein Verhandlungsentwurf zur Haftung könnte folgende Regelungen umfassen:

Die Staaten verpflichten sich, keine Verletzung des öffentlichen Gutes Erdatmosphäre („Gemeinsames Erbe der Menschheit“) zuzulassen und ergreifen Vorsorgemaßnahmen zum Schutz des Klimas. Die Staaten sind jeweils für ihr Hoheitsgebiet verantwortlich. Die Staaten sind selbständig für den Schutz der Erdatmosphäre verantwortlich und verpflichten sich,

keine Maßnahmen zu ergreifen, die die Risiken nur zu Lasten Dritter verlagern. Für die Zuweisung der Verursachung von Schäden genügt der Nachweis der überwiegenden Wahrscheinlichkeit.

## 5. Rechtsformen überdenken

Die Diskussion auf internationaler Ebene läßt vermuten, daß die von der Enquete-Kommission vorgeschlagene Regelung einer Tropenwaldkonvention einerseits und einer Konvention über Klima und Energie andererseits keine Unterstützung findet. Wichtige Institutionen wie die EG oder die FAO haben in der Zwischenzeit andere Rechtsformen vorgeschlagen:

- FAO und USA fordern eine Klimakonvention für alle Wälder und eine zusätzliche Klimakonvention;
- ‚EG-Gipfel‘ und IPCC favorisieren eine Klimakonvention mit Protokollen über Wälder und andere klimarelevante Aktivitäten.

Vor dem Hintergrund dieser Festlegungen wird ein Stufenverfahren vorgeschlagen. Heute sollten Elemente und Eckpunkte einer Klimakonvention benannt werden, die sich schrittweise zu einer endgültigen Rechtsform vereinigen lassen.

Sollten sich im weiteren Verhandlungsprozeß wichtige Staaten mit hohen Kohlendioxid-Emissionen (z. B. USA oder UdSSR) weiterhin als Bremser betätigen, sind als Vorstufe zu einem globalen Abkommen regionale Vereinbarungen anzustreben. Nach dem gegenwärtigen Stand der internationalen Diskussion könnten sich z. B. die EG-Staaten, Schweden, Norwegen, Österreich und Schweiz an einem regionalen Klimaabkommen beteiligen. Ein derartiges Abkommen sollte so ausgestaltet sein, daß es für die Einbeziehung weiterer Staaten offen ist.

## ABSCHNITT G

### Gesamtstrategie zum Schutz der Erdatmosphäre

Mit dem nunmehr vorliegenden dritten Bericht hat die Kommission umfassend zu den Problembereichen

- Zerstörung der Ozonschicht in der Stratosphäre (erster und dritter Bericht),
- zusätzlicher Treibhauseffekt (erster, zweiter und dritter Bericht) und
- Vernichtung der tropischen Wälder (erster und zweiter Bericht)

Stellung genommen und zu allen diesen Bereichen Empfehlungen für das weitere nationale, EG-weite und internationale Vorgehen vorgelegt.

Ausgehend vom Einsetzungsbeschluß des Deutschen Bundestages (1), in dem der Enquete-Kommission die Aufgabe zugewiesen wird, eine Bestandsaufnahme über die globalen Veränderungen der Erdatmosphäre vorzunehmen und den Stand der Ursachen- und Wirkungsforschung festzustellen sowie mögliche nationale und internationale Vorsorge- und Gegenmaßnahmen zum Schutz von Mensch und Umwelt vorzuschlagen, hat sich die Enquete-Kommission zunächst einen Überblick über den wissenschaftlichen Kenntnisstand und bisherige politische Maßnahmen verschafft. Übereinstimmend war die Kommission der Auffassung, daß diese Bestandsaufnahme vor allem im Hinblick auf den Ozonabbau in der Stratosphäre und den zusätzlichen Treibhauseffekt erfolgen sollte.

Bereits in ihren ersten Sitzungen erkannte die Kommission, daß sich die Sachlage in diesen beiden Bereichen im Vergleich völlig anders darstellt. Während es wissenschaftlich unstrittig war und ist, daß der Ozonabbau in der Stratosphäre stattfand und -findet und erhebliche klimatische Folgen nach sich zieht, war dies im Hinblick auf den zusätzlichen Treibhauseffekt 1987 noch nicht der Fall.

Entsprechend weit waren die politischen Überlegungen gediehen. Während sich die Internationale Staatengemeinschaft im Bereich des Ozonabbaus in der Stratosphäre bereits mit dem Wiener Übereinkommen zum Schutz der Ozonschicht aus dem Jahr 1985 (2) und dem Montrealer Protokoll über Stoffe, die zu einem Abbau der Ozonschicht führen (3), aus dem Jahr 1987 über ein internationales Vorgehen verständigt hatte, war die Diskussion über Vorsorgemaßnahmen und Handlungsstrategien zur Eindämmung des zusätzlichen Treibhauseffektes noch nicht so weit fortgeschritten. Symptomatisch für die damalige Situation war, daß der Vertragstext zum Wiener Übereinkommen ausschließlich auf den Schutz der Ozonschicht ausgerichtet ist, der Anteil der FCKW am zusätzlichen Treibhauseffekt hingegen nicht einmal erwähnt wird.

Diese unterschiedliche Ausgangslage in den genannten Bereichen beeinflusste entscheidend die weitere Arbeit und die politische Strategie der Kommission. Bereits in der ersten Sitzung der Kommission war den Ausführungen des Vorsitzenden einvernehmlich zugestimmt worden, daß die Kommission dem Deutschen Bundestag nicht nur Empfehlungen im Rahmen des von ihr abzugebenden Zwischen- oder Abschlußberichtes vorlegen sollte, sondern darüber hinaus angestrebt werden sollte, daß bei eindeutigen Zwischenergebnissen und Forderungen der Kommission, die sich aus der laufenden Arbeit ergäben, die in der Kommission vertretenen Mitglieder des Bundestages, die in den parlamentarischen Beratungsprozessen fest eingebunden seien, über ihre Fraktion initiativ würden und über entsprechende Initiativen versucht werde, Ergebnisse der Kommissionsarbeit laufend umzusetzen. Gerade dies sei die eigentliche Aufgabe und Chance einer Enquete-Kommission, daß sie nicht nur der Politik wissenschaftliche Erkenntnisse vermittele und Empfehlungen erarbeite, die am Ende einer Wahlperiode vorgelegt und dann nicht mehr oder nicht frühzeitig genug in parlamentarischen Beschlüssen umgesetzt würden, sondern daß sie die enge Verzahnung zwischen Politik und Wissenschaft in einem solchen Gremium dazu nutze, fundierte wissenschaftliche Erkenntnisse laufend in konkrete parlamentarische oder über das Parlament durch kritische Empfehlungen in exekutive Maßnahmen umzusetzen (4).

Es war offensichtlich, daß ein solches Vorgehen angesichts der Vorarbeiten auf nationaler, EG-weiter und internationaler Ebene zum Schutz der Ozonschicht in der Stratosphäre besonders in diesem Politikbereich möglich war. Im Bereich „Zusätzlicher Treibhauseffekt“ hingegen war noch erheblicher Forschungsaufwand notwendig, mußte zunächst noch erhebliche Überzeugungsarbeit geleistet werden, um den politischen Willen für umfassende Maßnahmen zu schaffen.

Der erste Bericht „Schutz der Erdatmosphäre“, den die Enquete-Kommission bereits elf Monate nach ihrer Konstituierung dem Deutschen Bundestag vorlegte, enthält dementsprechend detaillierte Empfehlungen zum Schutz der Ozonschicht in der Stratosphäre, wobei hierdurch gleichzeitig infolge der Reduktion der FCKW ein Beitrag zur Eindämmung des zusätzlichen Treibhauseffektes geleistet wurde. Darüber hinaus wurden zur Eindämmung des zusätzlichen Treibhauseffektes für andere Bereiche noch keine bestimmten Reduktionsquoten und Vorgehensweisen konkretisiert. Allerdings hat die Kommission schon in ihrem ersten Bericht darauf hingewiesen, daß in Anbetracht der Komplexität, der Unsicherheiten und der Dimension des Problems trotz der vorgeschlagenen FCKW-Reduktion weiterhin ein außerordent-

lich großer Handlungsbedarf besteht und daß tiefgehende sowie langfristig angelegte Handlungsstrategien auf internationaler und nationaler Ebene entwickelt werden müssen.

Daß zum zusätzlichen Treibhauseffekt mit Ausnahme der FCKW-Reduktion keine differenzierten Maßnahmenempfehlungen zu diesem frühen Zeitpunkt der Kommissionstätigkeit vorgelegt wurden, hängt vor allem damit zusammen, daß die Ursachen des zusätzlichen Treibhauseffekts im Vergleich zum Ozonabbau in der Stratosphäre wesentlich komplexer sind. Beteiligt sind neben den FCKW, die schon für den Ozonabbau der Stratosphäre verantwortlich sind, vor allem energiebedingte klimarelevante Spurengasemissionen, die Emissionen aus der Vernichtung der tropischen Wälder und die Emissionen aus landwirtschaftlicher Tätigkeit (vgl. zu den Ursachen des zusätzlichen Treibhauseffekts Abb. 1).

Während die Enquete-Kommission durch ihre detaillierten Maßnahmenvorschläge zum FCKW-Bereich gleichzeitig durch deren Absenkung einen Beitrag zur Eindämmung des zusätzlichen Treibhauseffektes geleistet hat, lieferte sie im Hinblick auf die anderen Politikfelder einen Problemaufriß, der den Stand der damaligen internationalen und nationalen Diskussion wiedergibt und gleichzeitig Perspektiven für das weitere Vorgehen der Enquete-Kommission enthält. Die entsprechenden Ausführungen waren von der Kommission nicht nur als Diskussionsgrundlage gedacht, sondern es wurden auch Prioritäten aufgezeigt, in dem der Energieeinsparung auf der Suche nach Lösungswegen zur Senkung des fossilen Energieverbrauchs eine besondere Bedeutung zugemessen wurde.

Sehr frühzeitig erkannte die Kommission auch, daß die Vernichtung der tropischen Wälder ein besonders komplexes entwicklungspolitisches Aufgabengebiet

darstellt, das mit gravierenden wirtschaftlichen, sozialen und ökologischen Auswirkungen verbunden ist. Der Kommission wurde deutlich, daß diese Thematik nicht nur unter Klimagesichtspunkten diskutiert werden kann. Angesichts der Fülle der Probleme und der Komplexität der bereits in den ersten Bericht aufgenommenen Themenbereiche entschloß sich die Kommission, die Vernichtung der tropischen Wälder im ersten Bericht nur kurz abzuhandeln, um dann im Verlauf ihrer weiteren Kommissionstätigkeit einen gesonderten Bericht zu erarbeiten, der sich ausschließlich mit diesem Sachbereich befassen sollte.

Parallel zur Arbeit an ihrem zweiten Bericht „Schutz der tropischen Wälder“, der Mitte des Jahres 1990 fertiggestellt worden ist, hat die Kommission sich intensiv mit der Problematik der Reduktion energiebedingter klimarelevanter Spurengase und der Ausgestaltung einer internationalen Konvention zum Schutz der Erdatmosphäre befaßt. Um auch in diesem Bereich zu vertieften Aussagen und zur Erarbeitung möglicher Maßnahmen zu gelangen, hat die Kommission ein umfangreiches Studienprogramm in Auftrag gegeben, dessen Einzelergebnisse seit November 1989 vorliegen und seither zusammengefaßt und intensiv mit den Projektleitern einzelner Studienkomplexe beraten worden sind. Abschnitt E und F dieses Berichtes basieren größtenteils auf dieser Vorarbeit.

Die folgenden Überlegungen zu einer Gesamtstrategie zum Schutz der Erdatmosphäre ergeben sich aus dieser nunmehr drei Jahre währenden intensiven Befassung der Enquete-Kommission mit einer Politik zum Schutz der Erdatmosphäre. Ausgehend von den in den ersten beiden Berichten und in den vorangegangenen Abschnitten dieses Berichts vorgeschlagenen und zum Teil bereits umgesetzten Maßnahmen werden dabei Perspektiven für das künftige Vorgehen entwickelt.

## 1. KAPITEL

### Politische Maßnahmen

Bei aller Bedeutung von nationalem und regionalem Handeln ist es offensichtlich, daß der Schutz der Erdatmosphäre zwingend eine verstärkte internationale Zusammenarbeit erfordert. Nationale Aktivitäten allein sind oft nur begrenzt dazu geeignet, länderübergreifenden umweltschädliche Emissionen und ökologischen Katastrophen zu begegnen. Hier ist die Internationale Staatengemeinschaft gefordert.

Demzufolge hat die Kommission bei der Erarbeitung ihrer Berichte großen Wert auf die Formulierung richtungsweisender, möglichst weitreichender und umsetzbarer Maßnahmenvorschläge nicht nur für den nationalen sondern auch den internationalen Bereich gelegt, bei denen davon auszugehen ist, daß sie entscheidend zur Problemlösung beitragen. Für die Realisierung dieser Maßnahmenvorschläge wurden problemorientierte enge Zeitvorgaben entwickelt, die

nur mit erheblichen Anstrengungen unter Zusammenfassung aller Kräfte eingehalten werden können.

Zur Umsetzung der internationalen Maßnahmenvorschläge wurden insbesondere internationale Übereinkommen in Form von Konventionen und dazugehörigen Protokollen und die Einrichtung eines Umweltrafes vorgeschlagen.

#### 1. Das Vertragswerk zum Schutz der Erdatmosphäre

Erfolgversprechendes Handeln auf internationaler Ebene erfordert Zusammenarbeit und die Berücksichtigung unterschiedlicher Interessenlagen, wobei die Grenze dieses Verfahrens von der Sachlage vorgege-

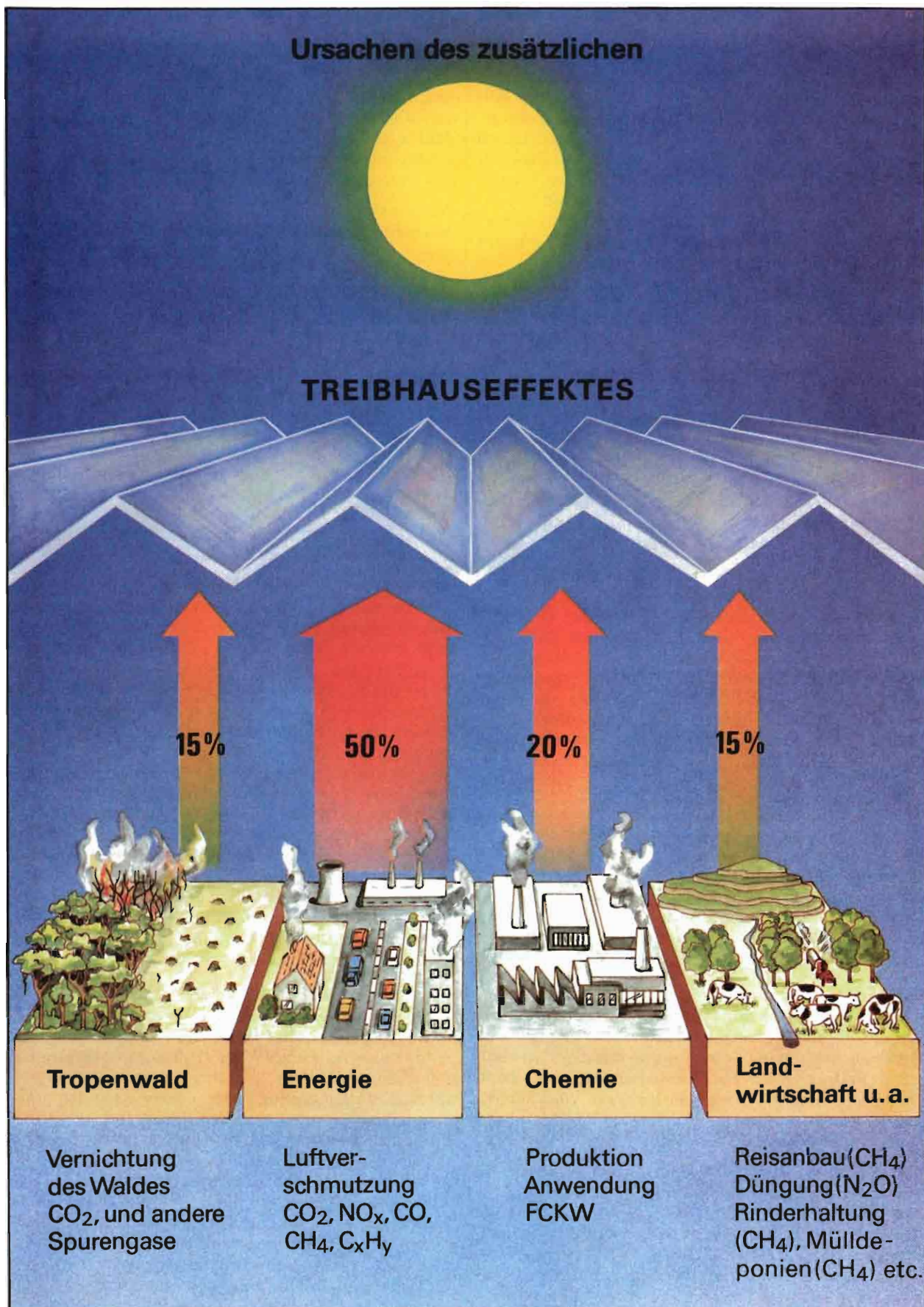


Abb. 1: Ursachen des zusätzlichen Treibhauseffektes (vgl. zur Erläuterung Abschnitt A, 1. Kapitel Nr. 1).

ben wird. Ziel ist es, eine gut koordinierte und möglichst gleichgerichtete Durchführung, Finanzierung oder Kontrolle von Maßnahmen zu erreichen. Die Enquete-Kommission geht davon aus, daß gegenwärtig nur das Instrumentarium eines völkerrechtlichen Abkommens Gewähr für eine Umsetzung von Lösungsvorschlägen auf internationaler Ebene bietet. Durch die Beachtung der völkerrechtlichen Grundsätze der souveränen Gleichheit aller Staaten und der Territorialhoheit eines jeden einzelnen Staates kann bei der Formulierung von internationalen Strategien sichergestellt werden, daß sie für die Betroffenen überhaupt akzeptabel sind und diese von sich aus den Willen haben, aktiv an der Realisierung solcher Lösungsvorschläge mitzuwirken.

Allerdings dürfen die Bemühungen um internationale Abkommen nicht als Entschuldigung für die Unterlassung anderer internationaler sowie regionaler und nationaler Maßnahmen dienen. Internationale Abkommen stellen vielfach nur den ersten Einstieg in maßnahmenorientiertes Handeln dar. Sie sind auch deshalb kein Ersatz für nationales Handeln, weil sie eben dieses koordinieren und fördern sollen. Grundsatz muß es daher sein, daß die nationalen Regelungen, wo immer möglich, über die Mindestanforderungen der internationalen Abkommen hinausgehen.

Bereits in ihrem ersten Bericht hat sich die Enquete-Kommission für den raschen Abschluß einer Reihe von sachbereich- oder einzelstoffbezogenen Detailabkommen ausgesprochen (5). Zu diesem Zeitpunkt hatte die Internationale Staatengemeinschaft mit dem Wiener Übereinkommen zum Schutz der Ozonschicht und dem Montrealer Protokoll über Stoffe, die zu einem Abbau der Ozonschicht führen, völkerrechtliche Instrumente zum Schutz der Ozonschicht und gleichzeitig zur Eindämmung des zusätzlichen Treibhauseffektes vorgelegt.

In ihrem zweiten Bericht hat die Enquete-Kommission vorgeschlagen, daß sich die internationale Staatengemeinschaft bis zur UN-Konferenz über Umwelt und Entwicklung 1992 in Brasilien über eine Internationale Konvention zum Schutz der tropischen Wälder verständigt, die zu einem späteren Zeitpunkt durch ein Protokoll und einen internationalen Treuhandfonds näher ausgestaltet werden soll (6).

Mit der Vereinbarung über eine Internationale Konvention zum Schutz der Tropenwälder läge nach dem Wiener Übereinkommen zum Schutz der Ozonschicht ein zweites Rahmenabkommen vor, das einen wesentlichen Beitrag zum Schutz der Erdatmosphäre leistet. Zwei bedeutende Ursachen für den zusätzlichen Treibhauseffekt wären dann durch völkerrechtliche Vereinbarungen erfaßt (vgl. Abb. 1).

Gleichzeitig müssen mit Nachdruck alle Anstrengungen unternommen werden, um ebenfalls auf der UN-Konferenz über Umwelt und Entwicklung 1992 ein internationales Vorgehen in einem weiteren ursächlich für den zusätzlichen Treibhauseffekt verantwortlichen Bereich, nämlich der Emission energiebedingter klimarelevanter Spurengase, zu beschließen.

Dieses parallele Vorgehen ist anzustreben, da von den Tropenwäldern nicht erwartet werden kann, daß sie ihren Beitrag zur Eindämmung des zusätzlichen

Treibhauseffektes leisten, solange vor allem die Industrienationen als Hauptemittenten der meisten energiebedingten klimarelevanten Spurengase nicht dazu bereit sind, forcierte Maßnahmen zur Verringerung der Schadstoffemissionen aus dem Energiesektor zu beschließen und zu realisieren. Gerade der Energiesektor hat weltweit mit 50 Prozent einen größeren Anteil am zusätzlichen Treibhauseffekt als alle anderen Bereiche.

Ausgehend von dieser Situation werden derzeit zwei Vorgehensweisen diskutiert:

- Schaffung einer sogenannten Klima-Konvention, die sowohl den Bereich „Energie“ wie den Bereich „Wälder“ regeln soll,
- Schaffung sektoraler Übereinkommen für jeden Bereich und spätere Zusammenführung der Regelungsinhalte, die im Gesamtgefüge der Sektorkonventionen dem Schutz der Erdatmosphäre dienen, in eine Gesamtkonvention zum Schutz der Erdatmosphäre.

Um den ganz unterschiedlichen Aufgabenstellungen in beiden Sachbereichen gerecht werden zu können, hat sich die Kommission unter Berücksichtigung der Gesamtzusammenhänge für den zweiten Weg – also ein zunächst sektorales Vorgehen – entschieden.

Die Enquete-Kommission hält es für den erfolgversprechendsten Weg, zunächst separate Lösungskonzepte zu verabschieden, die sich an den spezifischen Ursachen der Tropenwaldzerstörung beziehungsweise der Emission energiebedingter klimarelevanter Spurengase orientieren müssen. Dies setzt voraus, daß eine gesonderte Analyse vorgenommen wird. Beide Bereiche sind durch Problemlagen gekennzeichnet, die aufgrund völlig unterschiedlicher Sachzusammenhänge weit über die Treibhausproblematik hinausgehen. So hat die Vernichtung der tropischen Wälder nicht nur klimatische, sondern auch gravierende ökologische, ökonomische und soziale Folgen (7). Vor allem aus diesem Grund hatte sich die Kommission dazu entschlossen, die Tropenwaldproblematik gesondert in ihrem zweiten Bericht zu erörtern. Sie hat dabei im Überblick auch auf die Situation der Wälder außerhalb der Tropen hingewiesen.

Auf internationaler Ebene wird zur Zeit erwogen, auch diese Wälder in eine sektorale Regelung für alle Wälder (International Forest Convention) aufzunehmen. Diese Auffassung findet sich unter anderem in dem Bericht einer unabhängigen Kommission wieder, die von der Ernährungs- und Landwirtschaftsorganisation der Vereinten Nationen (Food and Agriculture Organization of the United Nations, FAO) eingesetzt wurde, um Vorschläge für die Reformierung des Tropen-Forstwirtschafts-Aktionsplans (Tropical Forestry Action Plan, TFAP) auszuarbeiten (8). Die Enquete-Kommission sieht in diesem Vorschlag keinen inhaltlichen Widerspruch zum von ihr empfohlenen Vorgehen, da auch im Zentrum einer Waldkonvention die Bemühungen um die Unterstützung der Tropenwälder stehen müßten. Es erscheint der Kommission kaum vorstellbar, daß die internationale Staatengemeinschaft den Industrienationen Gelder zum Schutz der Wälder in gemäßigten und nördlichen Breiten be-



reitstellen könnte. Die Erhaltung der heimischen Wälder ist eine Aufgabe, die die entwickelten Staaten sicherlich aus eigener Kraft leisten können.

Im Energiesektor ist eine erfolgreiche Umsetzung von Reduktionszielen nur möglich, wenn vor allem auch zentrale Fragen der Energieversorgungspolitik, der Energieverbrauchspolitik und der Verkehrspolitik mit Schwerpunkt in den Industrieländern und – entsprechend angepaßt an die andere Situation – in den Entwicklungsländern gelöst werden. Die Abschnitte E und F des vorliegenden dritten Berichts verdeutlichen, welche immensen Probleme hier bestehen, gleichwohl aber einer Lösung zugeführt werden müssen.

Erfolgsversprechende Lösungsvorschläge für beide Bereiche verfolgen somit zwar zum Teil das Ziel, den zusätzlich vom Menschen verursachten Treibhauseffekt einzudämmen, haben aber zusätzlich eine Reihe weiterer wichtiger Ziele beziehungsweise Schutzzwecke.

Ein weiterer wichtiger Grund für ein zunächst sektorales Vorgehen ist, daß die unterschiedlichen Ausgangsbedingungen der Länder, die für eine internationale Kooperation in beiden Bereichen gewonnen werden sollen, analysiert und berücksichtigt werden müssen. Ein Tropenwaldland, dessen Wälder fast völlig vernichtet sind, dessen Anteil an den weltweiten energiebedingten Spurengasemissionen aber vernachlässigbar ist, hat eine ganz andere Ausgangs- und Interessenlage als ein Tropenwaldland mit hohem Energieverbrauch oder ein Land ohne Tropenwaldvorkommen. Dies wird sich auf die Verhandlungsposition des jeweiligen Landes auswirken. Verhandlungen über eine übergreifende Konvention zu beiden Sachgebieten wären daher infolge völlig unterschiedlicher Ausgangslagen vor große Probleme gestellt, wenn nicht gar von vornherein zum Scheitern verurteilt.

Hinzu kommen praktische Erwägungen, deren Auswirkungen auf das Verhandlungstempo und das zu erzielende Gesamtergebnis nicht unterschätzt werden dürfen. Wie in der Bundesrepublik Deutschland ist auch in anderen Staaten von einer wechselnden Zuständigkeit für Maßnahmen zum Schutz der tropischen Wälder, zum Schutz der Ozonschicht und zur Reduktion energiebedingter klimarelevanter Spurengasemissionen auszugehen. Die Kommission hat diese Annahme bei der Erstellung ihrer Berichte bestätigt gefunden. Dies bedeutet, daß an den notwendigen Verhandlungen über eine Konvention, die sowohl die Tropenwälder als auch den Energiebereich umfassen soll, für jeden der beiden Themenkomplexe eine Vielzahl von zuständigen nationalen und internationalen Behörden und Experten zu beteiligen wäre. Der auf diese Weise schon auf nationaler Ebene entstehende Abstimmungsprozeß würde auf regionaler und internationaler Ebene fortgeführt werden müssen. Unnötige Zeitverzögerungen und ein Trend hin zu allgemeinen Formulierungen statt konkreten Beschlüssen wären die Folge.

Die Kommission geht daher davon aus, daß sektorale Lösungen verbunden mit einem schrittweisen Vorgehen eher durchsetzbar und wesentlich schneller reali-

sierbar sind, als der Versuch einer sofortigen gemeinsamen Regelung beider Bereiche.

Aus diesen Gründen empfiehlt die Enquete-Kommission, parallel zur Internationalen Konvention zum Schutz der tropischen Wälder ein internationales Übereinkommen zur Reduktion energiebedingter klimarelevanter Spurengasemissionen auszuhandeln. Um den Bezug zum tatsächlichen Regelungsgehalt herzustellen und damit eine korrekte Bezeichnung der Konvention zu erhalten, andererseits aber dem Bestreben Rechnung zu tragen, einem solchen Vertragswerk einen kurzen und prägnanten Titel mit Hinweis auf die Klimaproblematik zu geben, schlägt die Enquete-Kommission die Verabschiedung eines Übereinkommens mit dem Titel „Internationale Konvention über Klima und Energie“ vor. Sowohl diese Konvention wie auch die Internationale Konvention zum Schutz der tropischen Wälder sollten spätestens auf der 1992 in Brasilien stattfindenden UN-Konferenz über Umwelt und Entwicklung verabschiedet werden (vgl. Abschnitt F, 2. und 3. Kapitel).

Zwanzig Jahre nach der Konferenz der Vereinten Nationen über die Umwelt des Menschen in Stockholm wird die UN-Konferenz über Umwelt und Entwicklung in Brasilien eine entscheidende Rolle für die Entwicklung in den nächsten Jahrzehnten spielen.

Angesichts dessen müssen alle Anstrengungen dafür unternommen werden, daß beide Konventionen verabschiedet werden und somit die UN-Konferenz über Umwelt und Entwicklung erfolgreich abgeschlossen werden kann. Um dieses Ziel zu erreichen, muß es vor allem gelingen, die vorgenannten Vertragsentwürfe rechtzeitig vor Konferenzbeginn vorzulegen. Der UN-Konferenz müssen daher bereits 1991 Vorbereitungskonferenzen vorausgehen, die die inhaltliche Vorarbeit übernehmen. Verhandlungsziel dieser Vorbereitungskonferenzen sollte es zum einen sein, die Grundzüge der zu vereinbarenden Konventionen auszuarbeiten, damit diese 1992 auf der UN-Konferenz verabschiedet werden können. Zum anderen sollten grundlegende Entscheidungen über die Regelungsinhalte der Protokolle getroffen werden, die die Internationale Konvention über Energie und Klima und die Internationale Konvention zum Schutz der tropischen Wälder konkretisieren sollen, damit diese Protokolle spätestens 1994, wenn möglich früher, ebenfalls verabschiedet werden können. Die Enquete-Kommission ersucht die Bundesregierung, sich auf der im November 1990 in Genf stattfindenden 2. Weltklimakonferenz für ein entsprechendes Vorgehen einzusetzen.

Dieses schrittweise und sektorale Vorgehen hat gegenüber dem gleichfalls diskutierten Vorschlag, eine sogenannte Klima-Konvention (Vorschlag der USA auf der Toronto-Konferenz) oder eine Konvention zum Schutz vor weltweiten Klimaänderungen (Entwurf des IPCC) auszuarbeiten, die bereits dargelegten Vorteile.

Hinzu kommt, daß diese Konventionsentwürfe durch die Verwendung des Begriffs „Klima“ beziehungsweise „klimatische Veränderungen“ den Eindruck erwecken, als würden sie alle Ursachen von Klimaveränderungen umfassen. Dies ist offensichtlich nicht der Fall, da zwar Regelungen zur Reduktion der energie-

bedingten klimarelevanten Spurengasemissionen und zum Schutz der Wälder innerhalb und außerhalb der Tropen getroffen werden sollen, zum Beispiel die FCKW aber nicht erfaßt sind. Gerade Maßnahmen in diesem Bereich leisten aber bis zur Jahrtausendwende den mit Abstand stärksten Beitrag zur Reduktion der klimarelevanten Spurengase, so daß die hier getroffenen Vereinbarungen (Wiener Übereinkommen, Montrealer Protokoll, 2. Vertragsstaaten-Konferenz in London) weit eher als alle anderen möglichen und zur Zeit diskutierten Vereinbarungen die Bezeichnung „Klima-Konvention“ oder „Konvention zum Schutz vor weltweiten Klimaänderungen“ verdient hätten.

Bevor eine Konvention verabschiedet wird, die alle klimarelevanten Spurengase regelt, müssen zudem zunächst weitere sektorale Übereinkommen ausgehandelt und verabschiedet werden, die bisher noch nicht geregelte Spurengase umfassen.

Bereits in ihrem ersten Bericht hat die Enquete-Kommission darauf aufmerksam gemacht, daß landwirtschaftliche Produktionsprozesse eine wichtige Ursache für den zusätzlichen Treibhauseffekt sind. Bisher konnte dieser Bereich unter klimatischen Gesichtspunkten weder von der Enquete-Kommission noch von anderen Institutionen in vollem Umfang aufgearbeitet werden. Dies ist dringend notwendig, da die Emissionen von Treibhausgasen aus der Landwirtschaft – vor allem Methan (CH<sub>4</sub>) und Distickstoffoxid (N<sub>2</sub>O) – etwa 15 Prozent zum zusätzlichen Treibhauseffekt beitragen (vgl. Abb. 1). Auch eine Studie über Zukunftsperspektiven der Landwirtschaft, die im Auftrag der Enquete-Kommission „Technikfolgen-Abschätzung und Bewertung“ des 11. Deutschen Bundestages erstellt wurde, kommt zu dem Ergebnis, daß für die Bewertung von Entwicklungsszenarien der zu-

künftigen Landwirtschaft eine umfassende und gründliche Untersuchung klimatischer und anderer wesentlicher Faktoren erfolgen müsse (9).

Weiterhin hat die Kommission bereits frühzeitig darauf hingewiesen, daß zu prüfen ist, ob die Notwendigkeit besteht, industrielle und gewerbliche Verfahren und Anwendungsfelder, die mit relevanten Spurengasemissionen verbunden sind, sowie Emissionen aus Abfällen in Form geeigneter Teilabkommen zu erfassen und dadurch die Reduktion der Emissionen zu gewährleisten (10).

Auch diese Bereiche sollten zunächst sektoral aufgearbeitet und einer Regelung zugeführt und dann in einem zweiten Schritt in eine übergreifende Internationale Konvention zum Schutz der Erdatmosphäre integriert werden (vgl. Abb. 2).

Die Gesamtkonvention soll alle Übereinkommen, die in verschiedenen Bereichen einen Beitrag zum Schutz der Erdatmosphäre leisten, unter ein gemeinsames Dach zusammenführen. Die Enquete-Kommission sieht es als erforderlich an, daß spätestens 1998, wenn möglich früher, mit einer Überprüfung der Regelungsinhalte dieser Konventionen in einer Gesamtkonvention begonnen wird, damit spätestens im Jahr 2000, wenn möglich früher, die Gesamtkonvention zum Schutz der Erdatmosphäre verabschiedet werden kann.

Diese langfristig zu schaffende Internationale Konvention zum Schutz der Erdatmosphäre wäre eine Vorstufe zu einem internationalen Luftrecht, das den Schutzzweck verfolgen würde, die Emissionen aller an der Zerstörung der Erdatmosphäre und der Luftbelastung beteiligten Spurengase zu vermeiden oder zu reduzieren. Damit würde ein entscheidender Beitrag zur weiteren Kodifizierung eines internationalen Umweltrechts geleistet.

Tabelle 1

#### **Zeitplan für die Umsetzung der von der Enquete-Kommission vorgeschlagenen Gesamtstrategie zum Schutz der Erdatmosphäre**

- |      |  |
|------|--|
| 1990 | Empfehlung der 2. Weltklimakonferenz in Genf, sowohl eine Internationale Konvention über Klima und Energie als auch eine Internationale Konvention zum Schutz der tropischen Wälder auf der 1992 in Brasilien stattfindenden UN-Konferenz über Umwelt und Entwicklung zu verabschieden   |
| 1991 | Abhaltung zweier Vorbereitungskonferenzen zur Aushandlung der entsprechenden Konventionsentwürfe   |
| 1992 | Verabschiedung der Internationalen Konventionen über Klima und Energie und zum Schutz der tropischen Wälder während der UN-Konferenz über Umwelt und Entwicklung in Brasilien<br>Verschärfung und Erweiterung des Montrealer Protokolls über Stoffe, die zu einer Zerstörung der Ozonschicht führen anlässlich einer Vertragsstaatenkonferenz zum Montrealer Protokoll |
| 1994 | Verabschiedung der Durchführungsprotokolle zu den genannten Konventionen und der in beiden Konventionen vorgesehenen internationalen Treuhandfonds   |
| 1995 | Inkrafttreten der Protokolle   |
| 1998 | Vorbereitungskonferenz zur Ausarbeitung von Empfehlungen für eine Überführung aller bestehenden sektoralen internationalen Vereinbarungen, die dem Schutz der Erdatmosphäre dienen, in eine entsprechende Gesamtkonvention   |
| 2000 | Verabschiedung der Gesamtkonvention zum Schutz der Erdatmosphäre   |



Abb. 2: Vertragswerk zum Schutz der Erdatmosphäre.

## 2. Schaffung eines Umweltrates

Das dargelegte internationale Vertragswerk zum Schutz der Erdatmosphäre ist unter den gegebenen Bedingungen und Formen der jetzigen internationalen Zusammenarbeit, die gegenwärtig noch sehr stark vom Primat der nationalen Politik geprägt wird, zur Zeit der erfolgversprechendste Weg zur Eindämmung internationaler Umweltgefährdungen. Erfahrungen mit bisherigen vergleichbaren Abkommen zeigen, daß das entscheidende Kriterium effektiven Umweltschutzes der Wille der einzelnen Staaten ist, entsprechende Verpflichtungen zu übernehmen.

Allerdings ist der Enquete-Kommission bewußt, daß diese Vorgehensweise langfristig angesichts der Bedrohungslagen nicht dazu geeignet ist, Schaden von der Menschheit abzuhalten beziehungsweise zu begrenzen. Dies gilt insbesondere dann, wenn zu den bereits bestehenden Umweltgefahren neue krisenartige Entwicklungen hinzutreten. Es sei hier nur an die absehbare Verknappung des Trinkwassers erinnert.

Die Schaffung des nötigen Problembewußtseins und die sich daran anschließende Vorbereitung, Aushandlung und Durchführung von internationalen Vertragswerken nimmt sehr viel Zeit in Anspruch – Zeit, in der sich bereits erkannte Umweltgefahren erheblich verstärken oder neue Gefahrenmomente auftreten können. Diese Zeitdifferenz (time lag) zwischen dem Erkennen einer Umweltgefährdung und ersten Maßnahmen zur Abwendung dieser Gefahr führt nicht nur zu teilweise irreparablen Schäden für die Umwelt und die auf sie angewiesenen Menschen, sondern erhöht auch die Kosten zur Begrenzung und – soweit dies möglich ist – zur Behebung von Schäden.

Bisher haben sich die Mitglieder der internationalen Staatengemeinschaft trotz positiver Ansätze noch nicht auf Mechanismen und Verfahren verständigen können, die der Dimension des Problems in seiner ganzen Tragweite für den Fortbestand der Menschheit gerecht werden. Vielerorts wird die mangelnde

Durchschlagskraft des Umweltprogramms der Vereinten Nationen (UNEP) und anderer mit umweltpolitischen Fragestellungen befaßter Sonderorganisationen der Weltorganisation beklagt. Diese Organisationen können allerdings allesamt keine verbindlichen Rechtsnormen oder Einzelakte erlassen. Ihr sogenanntes „soft law“ (Richtlinien, Kodizes etc.) ist zwar sehr umfangreich, in seiner Durchsetzungskraft aber eher dürftig (vgl. Tab. 2).

Die Kritik fällt daher auf diejenigen zurück, die für die Ausgestaltung der Kompetenzen der kritisierten Organisationen verantwortlich sind. Es wurde bereits darauf hingewiesen, wie entscheidend die Bereitschaft zur Mitarbeit der souveränen Staaten für die Effektivität internationalen Umweltschutzes ist. Dieser Wille zur Mitarbeit beziehungsweise sein Fehlen ist nicht dadurch zu überspielen, daß eine Internationale Regierungsorganisation mit Aufgaben im Bereich des Umweltschutzes betraut wird, ihre Kompetenzen aber entsprechend dem Willen der Mitgliedsstaaten begrenzt sind.

Vordringliche Aufgabe ist es daher, schnellstmöglich in der internationalen Staatengemeinschaft das Bewußtsein für die Notwendigkeit der Einrichtung eines Umweltrates, dem in einem näher zu bestimmenden Umfang Entscheidungskompetenzen übertragen werden, zu schaffen.

Dies gilt umso mehr, als globale Umweltprobleme auch gravierende sicherheitspolitische Implikationen beinhalten. Nahrungsmangel infolge von Dürren, Verlust von Landmasse infolge eines Anstiegs des Meeresspiegels oder andere ökologisch bedingte Katastrophen können beispielsweise Wanderungsbewegungen über Staaten- oder Regionengrenzen hinweg bewirken. Gleichzeitig hätte ein zwar regional begrenzter aber atomar geführter Konflikt erhebliche klimatische Folgen.

Über die Einrichtung eines solchen Gremiums wurde bereits im Vorfeld der Stockholmer Konferenz der

Tabelle 2

### Kompetenzen von UN-Einrichtungen zum Erlaß von Umweltregeln (11)

Unverbindliche Empfehlungen, Resolutionen, Kodizes und Standards	Verbindliche Entscheidungen und Empfehlungen	Verbindliche Kodizes, Richtlinien und Regelungen	Rechtsnormen oder Einzelakte
Generalversammlung FAO IAEA ILO UNESCO Regionalkommissionen UNDP (einfache Mehrheit, in der Praxis Konsens) UNEP	WMO-Entscheidungen mit dem Quorum einer $\frac{2}{3}$ Mehrheit	IAEA-Kontrollrechte soweit Mitgliedstaat zustimmt IBRD (bei verbindlichen Resolutionen) WHO-Regelungen, denen die Mitglieder allerdings widersprechen können	—

Vereinten Nationen über die Umwelt des Menschen im Jahr 1972 gestritten. Entsprechende Vorschläge sind damals ebenso gescheitert wie eine Initiative zur Einrichtung einer UN-Sonderorganisation für den Bereich Umwelt. Damals wie heute geht es vor allem um die Klärung zweier zentraler Probleme:

- der Frage der Kompetenzen eines Lenkungsorgans, wobei insbesondere das Verhältnis der nationalen Rechtsnormen zur Rechtsetzungsbefugnis des zu schaffenden Umweltrats und die Formen der Zusammenarbeit des Rates mit anderen internationalen Regierungsorganisationen zu klären wäre, und
- die Verteilung der Stimmrechte.

Welche Probleme sich in diesen Bereichen ergeben könnten, läßt sich an der bisherigen Aufgabengestaltung des Umweltprogramms der Vereinten Nationen ablesen. Daß diese Umweltorganisation keine größeren Kompetenzen bei ihrer Gründung Anfang der siebziger Jahre erhalten hat, ist auf

- die Bemühungen der bestehenden Sonderorganisationen und anderen Einrichtungen der Vereinten Nationen um den Schutz ihrer eigenen Position (Besitzstandsdenken);
- das Interesse der bestehenden internationalen Regierungsorganisationen an einer Ausweitung der eigenen Kompetenzen und
- das uneingeschränkte Beharren der Mitgliedstaaten auf dem Souveränitätsprinzip

zurückzuführen. Angesichts der immer stärker in Erscheinung tretenden globalen Umweltprobleme, die nicht an Grenzen haltmachen, ist diese Haltung ein gefährlicher Anachronismus.

Die verschiedenen Vorschläge zur Schaffung eines Umweltrates enthalten gleichwohl – wenn überhaupt – nur rudimentäre Ausführungen zu den angesprochenen Problemen (12, 13, 14, 15, 16). Gegenwärtig wäre es schon ein großer Erfolg, wenn es gelänge, bis zur UN-Konferenz über Umwelt und Entwicklung 1992 die grundsätzliche Bereitschaft für die Schaffung eines Umweltrates zu wecken. Der zu schaffende Umweltrat macht allerdings nur dann Sinn, wenn er mit Kompetenzen versehen wird, die ihn tatsächlich dazu befähigen, auf andere Sonderorganisationen und sonstige Einrichtungen der Vereinten Nationen sowie vor allem auch die Mitgliedstaaten einzuwirken. Die Enquete-Kommission geht davon aus, daß dieses Ziel um so leichter erreichbar sein wird, wie bei der Behandlung der Kompetenz- und Stimmrechtsproblematik Fortschritte erzielt werden können. Sie vertritt die Auffassung, daß beide Bereiche eng miteinander verknüpft sind.

Um den Nationalstaaten die Zustimmung zu einer Abtretung von Kompetenzen zu erleichtern, müßten Verfahrens- und Befugnisstrukturen entwickelt werden, die sicherstellen, daß gegen den Willen der großen geopolitischen Blöcke nichts durchgesetzt werden kann. Hierzu muß vor allen Dingen geklärt werden, nach welchen Mechanismen das Abstimmungsverfahren innerhalb eines zu schaffenden Umweltrates der Vereinten Nationen gestaltet werden sollte.

Diese Frage hat die Enquete-Kommission bereits in ihrem zweiten Bericht erörtert. Sie kam zu dem Ergebnis, daß für das Abstimmungsverfahren im neu zu schaffenden Umweltrat keinesfalls

- das „Ein Land – eine Stimme“ – Prinzip,
- das Mehrheitsvotum in Verbund mit dem Vetorecht einzelner Mitglieder oder
- Stimmenwägungsmodelle

in Betracht kommen.

Umweltprobleme von globalem Ausmaß, zu deren Bekämpfung in mehr oder weniger jedem Land umfassende und tiefgreifende Maßnahmen erforderlich sind, können nicht von einem engeren Gremium gehandhabt werden, in dem das Stimmrecht einiger Staaten größeres Gewicht hat als das der übrigen Mitglieder. Auch das Abstimmungsverfahren „Ein Land – Eine Stimme“ dürfte angesichts der Dominanz der Entwicklungsländer in der internationalen Staatengemeinschaft mit allen damit verbundenen Implikationen – zum Beispiel der Entscheidungsgewalt über die zumeist im wesentlichen von den Industrieländern bereitgestellten Finanzmittel – nicht praktikabel sein. Für Stimmenwägungsmodelle wie sie zum Beispiel in der Weltbank oder dem Internationalen Währungsfonds (International Monetary Fund, IMF) angewendet werden, gilt dies ebenso, da sie in der Regel bestimmte Staatengruppen benachteiligen (17).

Die Kommission schlägt daher ein Modell vor, das allen Staatengruppen die Garantie gibt, daß gegen ihre Interessen keine Politik gemacht werden kann. Ein entsprechender Ansatz wurde bereits in den Normen über das Stimmrecht der Multilateralen Investitionsagentur (Multilateral Investment Guarantee Agency, MIGA) verwirklicht.

Die Grundzüge des organisatorischen Aufbaus der MIGA sind identisch mit denen anderer Organisationen der Weltbankgruppe, namentlich der Weltbank selbst. So verfügt sie wie diese über einen Rat der Gouverneure als Hauptorgan, ein Direktorium, das erstverantwortlich die Geschäftstätigkeit der Agentur im Versicherungsbereich und die Förderungsmaßnahmen zur Unterstützung von Investitionen regelt und überwacht, und einen Präsidenten, der Verwaltungsaufgaben wahrnimmt und dem hierfür notwendiges Personal untersteht.

Der Rat der Gouverneure ist gemäß Art. 31 Hauptorgan der Agentur und setzt sich aus je einem Vertreter pro Mitgliedsland zusammen. Der Rat bestimmt einen seiner Gouverneure zum Vorsitzenden.

Dem Rat obliegt grundsätzlich die Wahrnehmung aller Rechte und Befugnisse der Agentur als internationaler Regierungsorganisation insbesondere im völkerrechtlichen Verkehr im Rahmen des Gründungsvertrags. Dies gilt auch für alle ausdrücklich genannten Rechte und Befugnisse, soweit sie nicht anderen Organen zugewiesen sind und der Rat nicht von seinem Recht Gebrauch gemacht hat, eigene Befugnisse an andere Organe zu delegieren. Als Hauptorgan stünden ihm auch implizierte Rechte und Befugnisse zu, soweit sie sich im Einzelfall aus der Auslegung des

Gründungsvertrages im Hinblick auf die erklärte Zielsetzung (Art. 2) oder aus Sacherwägungen notwendig ergäben (18).

Bei der Stimmrechtsverteilung ging man in der MIGA neue Wege. Die Stimmrechte für die MIGA-Gremien sind auf die beiden Ländergruppen Industriestaaten — Entwicklungsländer aufgeteilt, wobei jedem Staat entsprechend seiner wirtschaftlichen Bedeutung ein bestimmter Anteil zugewiesen wird. Die Stimmrechtsregelung basiert auf dem Prinzip, daß die Länder der Gruppe 1 (Industriestaaten) und diejenigen der Gruppe 2 (Entwicklungsländer) insgesamt über die jeweils gleiche Stimmenzahl verfügen sollen. Hiervon ausgehend soll jeder Staat zunächst 177 Stimmrechte als Basiskontingent erhalten. Hinzu kommt je ein Stimmrecht für jeden Kapitalanteil, der ihm in der MIGA-Konvention zugewiesen wird (vgl. Art. 39). Während der ersten drei Jahre, in denen die MIGA existieren wird, ist sichergestellt, daß jede Gruppe mindestens 40 Prozent der Stimmrechte innehat. Sofern eine Gruppe dieses Ziel aus eigenen Kräften nicht erreicht, werden ihr zusätzliche Stimmrechte zugewiesen. Während des genannten Zeitraums bedürfen alle Entscheidungen der Zwei-Drittel-Mehrheit aller Stimmrechte, wobei diese mindestens 55 Prozent des ausgegebenen MIGA-Kapitals repräsentieren müssen. Durch diese Bestimmungen soll sichergestellt werden, daß während der Anlaufphase Entscheidungen nur mit der Unterstützung beider Ländergruppen getroffen werden können (19).

Dieser Mechanismus könnte als Verhandlungsgrundlage dienen, wobei die Sachlage noch dadurch vereinfacht wird, daß die Einrichtung eines Programmhaushaltes nicht notwendig ist, da der Umweltrat als Lenkungsorgan nicht selbst im Rahmen von Projekten oder Programmen tätig zu werden braucht. Diese Aufgabe sollte dem Umweltprogramm der Vereinten Nationen (UNEP) übertragen werden, das den Rang einer UN-Sonderorganisation erhalten sollte. Hinsichtlich der Finanzierung des Verwaltungshaushaltes eines Umweltrates schlägt die Enquete-Kommission vor, den allgemeinen Verteilungsschlüssel der UN-Generalversammlung zugrunde zu legen.

Der Enquete-Kommission scheinen somit die Schwierigkeiten einer für alle Staaten tragbaren Stimmrechtsverteilung und die Frage der Finanzierung überwindbar.

### 3. Empfehlungen

Im Rahmen einer Gesamtstrategie zum Schutz der Erdatmosphäre empfiehlt die Enquete-Kommission dem Deutschen Bundestag und der Bundesregierung dafür Sorge zu tragen, daß

- die Internationale Konvention über Klima und Energie und die Internationale Konvention zum Schutz der tropischen Wälder auf der UN-Konferenz über Umwelt und Entwicklung 1992 in Brasilien verabschiedet werden;
- der Bereich „Landwirtschaft — Klima — Erdatmosphäre“ in der nächsten Wahlperiode intensiv

bearbeitet wird, um dort bestehende Reduktionspotentiale für Methan (CH<sub>4</sub>) und Distickstoffoxid (N<sub>2</sub>O) zu ermitteln und entsprechende nationale, EG-weite und internationale Maßnahmenvorschläge zu entwickeln;

- der Bedarf für weitere sektorale Übereinkommen zum Schutz der Erdatmosphäre ermittelt sowie die ständige Überprüfung der bereits bestehenden oder vorgeschlagenen Übereinkommen und Protokolle vorgesehen wird;
- die Einrichtung eines Umweltrates auf der UN-Konferenz über Umwelt und Entwicklung 1992 in Brasilien als ein zentrales Thema der Konferenz behandelt wird.

### 4. Literaturverzeichnis:

- (1) Vgl. BT-Drucksache 11/971: Beschlussempfehlung und Bericht des Ausschusses für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit (21. Ausschuß) zum Antrag der CDU/CSU-Fraktion und der Fraktion der FDP „Einsetzung einer Enquete-Kommission „Vorsorge zum Schutz der Erdatmosphäre““ (BT-Drucksache 11/533) und zum Antrag der Fraktion DIE GRÜNEN „Einsetzung einer Enquete-Kommission „Langfristiger Klimaschutz““ (BT-Drucksache 11/787), Bonn, den 15.10.87
- (2) Vgl. BT-Drucksache 11/2271: Gesetzentwurf der Bundesregierung — Entwurf eines Gesetzes zu dem Übereinkommen vom 22. März 1985 zum Schutz der Ozonschicht (Wiener Übereinkommen), Bonn, den 06.05.1988
- (3) Vgl. BT-Drucksache 11/2676: Gesetzentwurf der Bundesregierung — Entwurf eines Gesetzes zu dem Montrealer Protokoll vom 16. September 1987 über Stoffe, die zu einem Abbau der Ozonschicht führen, Bonn, den 15.07.1988
- (4) Vgl. EK-Protokoll Nr. 1, S. 11 und zum Stellenwert der Arbeit von Enquete-Kommissionen im parlamentarischen Raum: Braß, Heiko: Enquete-Kommissionen im Spannungsfeld von Politik, Wissenschaft und Öffentlichkeit, in: Petermann, Thomas (Hrsg.): Das wohlberatene Parlament, Berlin 1990, S. 65-95
- (5) Vgl. erster Bericht, Abschnitt D, 3. Kap., S. 456
- (6) Vgl. zweiter Bericht, Abschnitt A
- (7) Vgl. zweiter Bericht, Abschnitt H
- (8) Vgl. TFAP-PAFT: Tropical Forestry Action Plan — Report of the Independent Review, Kuala Lumpur (Malaysia) 1990, S. 51
- (9) Vgl. EK „Technologiefolgen-Abschätzung und Bewertung“: Perspektiven zur Zukunft der Landwirtschaft (Agrarpfade). Studie des ISP — Eduard Pestel Institut für Systemforschung Hannover und der FG Umweltsystemanalyse der Universität/GhK Kassel im Auftrag der Enquete-Kommission „Technikfolgen-Abschätzung und Bewertung“ des 11. Deutschen Bundestages (KD 11/65), S. 190
- (10) Vgl. erster Bericht, Abschnitt D, 3. Kap., S. 518
- (11) Nach Kilian, Michael: Umweltschutz durch internationale Organisationen, Berlin 1987, S. 343
- (12) Vgl. Schmidbauer, Bernd: „Wir brauchen einen UN-Umweltrat“ (Interview), in: der Überblick 1/89, S. 53
- (13) Vgl. Brandt, Willy: „Brandt will Reform internationaler Organisationen“, in: Bonner Generalanzeiger vom 22. Juli 1989

- (14) Vgl. Moltke, Konrad von: The Economic Summit – An Environmental Agenda For Action (Draft), May 1989, S. 3
- (15) Vgl. Evangelischer Pressedienst: Club of Rome fordert Nord-Süd-Konferenz und UN-Umweltschutzrat, Frankfurt/Main, den 15. Juni 1989
- (16) Vgl. Presse- und Informationsamt der Bundesregierung (Hrsg.): Internationale Umweltschutzkonferenz in Den Haag, in: Bulletin Nr. 27, Bonn, den 15. März 1989, S. 242
- (17) Vgl. zweiter Bericht, Abschnitt I, 2. Kap. Nr 1
- (18) Vgl. Studienprogramm der EK, hier: E 5, S. 49
- (19) Vgl. Ebenroth, Carsten Thomas: Zur Bedeutung der Multilateral Investment Guarantee Agency für den internationalen Ressourcentransfer, in: Juristen-Zeitung 13/1987, S. 646

## 5. Abbildungsverzeichnis

Abb. 1: Ursachen des zusätzlichen Treibhauseffekts

Abb. 2: Vertragswerk zum Schutz der Erdatmosphäre

## 6. Tabellenverzeichnis

Tab. 1: Zeitplan für die Umsetzung der von der Enquete-Kommission vorgeschlagenen Gesamtstrategie zum Schutz der Erdatmosphäre

Tab. 2: Kompetenzen von UN-Einrichtungen zum Erlass von Umweltregeln

## 2. KAPITEL

### Forschungsempfehlungen

#### 1. Notwendigkeit satellitengestützter Fernerkundung

Die Auswirkungen anthropogener Veränderungen der Atmosphäre und der Erdoberfläche haben meist globale, mindestens aber regional großflächige Ausdehnung.

Globale Datensätze sind daher unerlässlich, insbesondere für das bessere Verständnis

- von Spurenstoffquellen und -senken sowie der Luftchemie in Troposphäre und Stratosphäre,
- der Prozesse in hochkomplexen, gekoppelten Systemen,
- der Trendbeobachtung und Trendvorhersage sowie
- der Verifikation gekoppelter Modelle der Atmosphäre, des Ozeans und der Biosphäre.

Es werden sowohl Datensätze mit hoher geometrischer und spektraler Auflösung bei hoher Genauigkeit als auch langjährige Datenreihen benötigt. Die satellitengestützte Fernerkundung ist für die Erforschung einer Vielzahl von Umweltproblemen, wie

- dem Abbau der Ozonschicht,
- der Verstärkung des Treibhauseffektes,
- dem Rückgang der Waldbestände – speziell der tropischen Wälder –,
- den Veränderungen der Landoberfläche,
- der Gewässer- und Meeresverschmutzung,
- den Schwankungen der Meeresströmung und der Ausdehnung von Meereis sowie auch

– für die Wechselwirkung zwischen Atmosphäre/Biosphäre

dringend notwendig.

Beispielsweise können die für Modellrechnungen notwendigen Daten, wie Vertikalprofile der Temperatur, des Wasserdampfes, der klimarelevanten und ozonzerstörenden Spurengase, in der notwendigen horizontalen Auflösung über großen Teilen der Erde nur durch Satellitensensoren bereitgestellt werden.

Ein Atmosphären- und Umweltsatellit ist aber nicht nur eine notwendige Ergänzung zu Bodenmeßstationen und Flugzeugmessungen, sondern erlaubt in gemeinsamer Auswertung aller Messungen den globalen Überblick und liefert sonst nicht zu erhaltende Klima- und Umweltparameter, wie die Strahlungsbilanz des Planeten Erde. Nur alle Meßplattformen zusammen können unser Verständnis komplexer Zusammenhänge rasch genug vermehren.

#### 2. Leistungsfähigkeit eines Atmosphären- und Umweltforschungssatelliten (ATMOS)

Die Enquete-Kommission hat sich bereits im Frühjahr 1989 mit der Thematik der Entwicklung eines europäischen oder nationalen Umweltforschungssatelliten auseinandergesetzt. Dabei wurde eine Internationalisierung angestrebt, um zu gewährleisten, daß die ATMOS-Daten einer breiten und internationalen Nutzergemeinschaft zur Verfügung gestellt werden.

Als Folge davon wurde vom BMFT im April 1989 ein Vergleich zwischen den benötigten globalen Daten zur Umwelterforschung und den tatsächlichen Daten, die von allen fliegenden, beschlossenen beziehungs-

weise geplanten Satelliten geliefert werden, veranlaßt. Es erhärtete sich die Vermutung, daß nach Beendigung der Missionsdauer des amerikanischen Satelliten UARS (Upper Atmosphere Research Satellite) etwa ab dem Jahr 1994 bis zu den polaren Erdbobachtungsplattformen der ESA und NASA (etwa im Jahr 1998) eine Lücke in bezug auf ausreichend genaue Daten, insbesondere zur Erforschung der Ozonchemie und der Meeresökologie, entstehen wird.

Durch einen Umweltsatelliten ATMOS mit Sensoren zur Fernerkundung der Atmosphäre und der Ozeanfarbe sollte diese Datenlücke gefüllt werden.

Im einzelnen sind für ATMOS bisher folgende Fernerkundungssensoren untersucht worden:

- AMAS (Advanced Millimeter Wave Atmospheric Sounder),  
Messung einiger klima- und ozonrelevanter Spurengase ( $H_2O$ ,  $CO$ ,  $O_3$ ,  $ClO$ ) sowie der Druck- und Temperaturprofile im Höhenbereich zwischen 15 und 100 Kilometer, wobei jedoch nicht alle Parameter im gesamten Höhenbereich gemessen werden können.
- MIPAS (Michelson Interferometer for Passive Atmospheric Sounding)  
Horizontsondierung mehrerer klima- und ozonrelevanter Spurengasfamilien sowie der Aerosolteilchen in der Stratosphäre durch Messung der spektral noch aufgelösten Wärmestrahlung. Zu den Gasen, für die Vertikalprofile abgeleitet werden können, gehören:  $O_3$ ,  $CO_2$ ,  $CH_4$ ,  $H_2O$ ,  $N_2O$ ,  $FCKW$ ,  $NO$ ,  $HNO_3$ ,  $HNO_4$ ,  $ClONO_2$ .
- SCIAMACHY (Scanning Imaging Absorption Spectrometer for Atmospheric Cartography)  
Messung ozon- und klimarelevanter Spurengase sowie der Aerosolteilchen und dünnen Wolken in der Stratosphäre bei Horizontsondierung und bei Nadirblick auch in der Troposphäre. Eine Auswahl der meßbaren Gase umfaßt  $O_3$ ,  $N_2O$ ,  $NO$ ,  $NO_2$ ,  $NO_3$ ,  $CO$ ,  $CO_2$ ,  $CH_2O$ ,  $CH_4$ ,  $H_2O$ ,  $BrO$ ,  $ClO$ ,  $OCIO$ ,  $SO_2$ .  
Bei Nadirblickrichtung ist die Auswahl jedoch eingeschränkt und  $ClO$  beziehungsweise  $OCIO$  in der Stratosphäre können nur unter Ozonlochbedingungen in den Polargebieten gemessen werden. SCIAMACHY mißt im Bereich der Sonneneinstrahlung und ist daher auf Messungen bei Tage begrenzt, bei Horizontsondierung gegen die Sonne sogar auf Sonnenauf- und untergänge.
- ROSIS (Reflective Optics System Imaging Spectrometer)  
Der Ozeansensor ROSIS soll durch die Registrierung der spektral hoch aufgelösten Wasserfarbe die zunehmende Verschmutzung der Meere, vor allem die der Küstengewässer, beobachten. Damit ist die globale Erfassung meeresbiologisch, ökologisch und klimatologisch wichtiger Parameter für die Überwachung von Gewässern, das Verständnis und die Früherkennung von außergewöhnlichen Planktonblüten, die Erforschung von Transportvorgängen in Auftriebsgebieten und vor allem im Küstenbereich, die Erfassung der Biomasse und somit von Stoffkreisläufen, insbesondere des Kohlenstoffzyklus, möglich. Darüber hinaus liefert

ROSI bei etwa 250 m horizontaler Auflösung globale Daten von Vegetationsparametern in bisher nicht bekannter spektraler Auflösung, zum Beispiel zur Interpretation von Landnutzungsänderungen und Vegetationsschäden. Auch atmosphärische Parameter wie die Wolkenhöhe, der Wasserdampfgehalt und die Trübung der Atmosphäre können gemessen werden (vgl. BMFT: ATMOS – Atmosphären- und Umweltforschungsatellit, Bonn 1990).

Auch in anderen Ländern existieren ähnliche Planungen zur Erforschung der Erdatmosphäre und der Erdoberfläche:

- ein französischer Vorschlag mit einer zu ATMOS ähnlichen Nutzlast (GLOBSAT),
- ein indischer Vorschlag (PEACE),
- Einzelprojekte, zum Beispiel auf der sowjetischen MIR-Station PRIRODA,
- ein japanischer Satellit ADEOS.

Das Ergebnis einer Analyse auf der Basis verfügbarer Informationen durch das BMFT, ergab, daß die genannten Experimente/Satelliten die Leistungsdaten von ATMOS nicht erreichen.

Die Vorteile eines Atmosphären- und Umweltsatelliten ATMOS liegen darin, daß

- gleichzeitige hochaufgelöste Messungen von einer großen Anzahl von Spurengasen durch drei Instrumente in unterschiedlichen Wellenlängenbereichen (UV bis IR) bei verschiedener Sensortechnik ermöglicht werden,
- eine gleichzeitige Beobachtung der Erdoberfläche (Ableitung von Spurengasquellen, Biomasseproduktion) und Messung troposphärischer Spurengase stattfindet und somit
- neue Einblicke in chemische Vorgänge in der Atmosphäre und die chemische/dynamische Kopplung zwischen der Troposphäre und der Stratosphäre erwartet werden.

### 3. Projektstatus und Finanzierbarkeit eines Atmosphären- und Umweltforschungsatelliten (ATMOS)

Eine vom BMFT veranlaßte Machbarkeitsstudie ergab, daß ATMOS technisch prinzipiell realisierbar ist und auch Anfang 1995 einsatzbereit sein kann. In einer erweiterten Projektphase (bis Januar 1991) werden durch die Industrie die noch verbliebenen technischen Probleme näher untersucht und Geräte- und Dokumentationsanforderungen für interessierte Partner erarbeitet.

Eine möglichst breite Nutzung der ATMOS-Daten soll durch die Vorbereitungen des ATMOS-Daten-Nutzerteams erreicht werden. Aufgabe dieses internationalen Teams, das aus Nutzern in der Wissenschaft, in Ministerien und nachgeschalteten Behörden besteht, ist es, im Rahmen einer vom BMFT finanzierten Datennutzerstudie bis zum Frühjahr 1991 eine erste Struktur der optimalen Nutzung von ATMOS-Daten zu erarbeiten.



#### 4. Empfehlungen

Aufgrund der dargestellten Sachlage sieht die Enquete-Kommission es als dringend notwendig an, daß zur Erforschung der Veränderungen in der Erdatmosphäre und an der Erdoberfläche ein Forschungssatellit bereitgestellt wird. Dieser Satellit soll den Informationsmangel, der voraussichtlich ab 1994 eintritt, durch globale und kontinuierliche Messungen

- der Konzentration sowie räumlichen und zeitlichen Verteilung klima- und ozonrelevanter Spurenstoffe,
- der Waldflächen,
- der Veränderungen an der Landoberfläche und in Küstenzonen
- der Phytoplanktonverteilung im Weltmeer

beheben.

Die Bundesregierung wird daher gebeten, alle notwendigen Maßnahmen einzuleiten, um die Datenlücke, die voraussichtlich ab 1994 in der Atmosphä-

ren- und Umweltforschung entsteht, zu schließen und zu diesem Zweck einen Satelliten auf europäischer Ebene anstreben und — für den Fall, daß sich dies nicht rechtzeitig realisieren läßt — einen entsprechenden nationalen Satelliten bereitstellen.

Dabei wird davon ausgegangen, daß die im Zuge der ökologischen Forschung laufenden beziehungsweise geplanten bodengestützten Flugzeugmessungen unberührt bleiben.

#### **Protokollnotiz des Kommissionsmitglieds Prof. Dr. Henicke zu Abschnitt G, 2. Kapitel, Nr. 4 „Empfehlungen“**

Ich habe mich bei der Abstimmung über Nr. 4 „Empfehlungen“ enthalten, weil hier eine eindeutige Empfehlung für das zuvor beschriebene ATMOS-Projekt abgegeben wird. Ohne genaue Kenntnis der Kosten und des Konzepts des Projekts sowie der möglichen Alternativen (auch in Kooperation mit anderen Partnern) halte ich eine Zustimmung zu diesem Projekt für nicht möglich.



## ANHANG

## 1. Gesamtliteraturverzeichnis

- Altshuller, A.P.: Review: Natural volatile organic substances and their effect on air quality in the United States. *Atmos. Environ.*, Band 17, 1983, S. 2131-2165
- Angell, J.K. und J. Korshover: Comparison of stratospheric trends in temperature, ozone and water vapor in the north temperate latitudes. *J. Appl. Meteorol.* 17, 1978, S. 1397
- Angell, J.K.: Relation of Antarctic 100 mb temperature and total ozone to equatorial QBO, equatorial SST, and sunspot number, 1958-87. *Geophys. Res. Lett.*, 15, 1988, S. 915-918
- Angell, J.K.: Variations and trends in tropospheric and stratospheric global temperature 1958—1987. *J. of Climate* Band 1, 1988, S. 1296-1313
- Anisimov O.A.: An assessment of permafrost sensitivity to changes in the global thermal regime of the land surface. *Meteorology and Hydrology*, 1989, S. 79-84
- Anthor, J.S.: The role of maintenance respiration in plant growth. *Plant Cell Environment*, 7, 1984, S. 561-569
- Arbeitsgemeinschaft Energiebilanzen: Energiebilanzen für die Bundesrepublik Deutschland, Frankfurt 1989.
- Aronian, P.F.; Scheff, P.A.; Wadden, R.A.: Wintertime source-reconciliation of ambient organics. *Atmos. Environ.*, Band 23, 1989, S. 911-920
- Aselmann, I.; Crutzen, P.J.: Freshwater wetlands: Global distribution of natural wetlands and rice paddies, their net primary productivity, seasonality, and possible methane emissions, 1990, Manuskript in Vorbereitung
- Atlas, E.: Evidence for C3 alkyl nitrates in rural and remote atmospheres. *Nature*, Band 331, 1988, S. 426-428
- Attmannspacher, W.; Hartmannsgruber, R.; Lang, P.: Langzeittendenzen des Ozons der Atmosphäre aufgrund der 1967 begonnenen Meßreihe am Meteorologischen Observatorium Hohenpeißenberg. *Meteorol. Rundschau* Band 37, 1984, S. 193-1990
- Baadgaart, O., C. H. Wulf, G. L. Wantzin und K. D. Cooper: UV-B and UV-C, but not UV-A, potentially induce the appearance of T6-DR + antigen presenting cells in human epidermis. in: *Journal of Investigations in Dermatology*, 89, 1987, S. 113-118
- Bacastow, R.B.; Maier-Raimer, E.: Circulation model of the ocean carbon cycle. *Climate Dynamics* Band 4, 1990, S.95-125
- Bach, W.: Der anthropogen gestörte Kohlenstoffkreislauf: Methoden zur Abschätzung der CO<sub>2</sub>-Entwicklung in der Vergangenheit und in der Zukunft. *Düsseldorfer Geobotan. Kolloquien* Heft 2, 1985, S. 3-23
- Bach, W.; Jung, H.-J.: Untersuchung der Beeinflussung des Klimas durch Spurengase mit Hilfe von Modellrechnungen. *Münstersche Geogr. Arbeiten*, Heft 26, 1987, S. 45 -64
- Bach, W.; Jain, A. K.: CFC greenhouse potential of scenarios possible under the Montreal Protocol. *Int. J. of Climatology*, 1990, in Druck
- Barber, R.T. und Chavez, F.P.: Biological Consequences of El Nino. *Science*, 222, 1983, S. 1203-1210
- Barnes, P.W. u. a.: Competition, morphology and canopy structure in wheat (*Triticum aestivum* L.) and wild oat (*Avena fatua* L.) exposed to enhanced ultraviolet-B-radiation. *Functional Ecology*, 2, 1988, S. 319-330
- Barnett, T.P.: Global sea level change. In: NCPO, Climate variations over the past century and the greenhouse effect. A report based on the „First Climate Trends Workshop“, 7.—9. September 1988, Washington, D.C., National Climate Program Office/NOAA, Rockville, Maryland, USA
- Bartholomew, G.W.; Alexander, M.: Soil as a sink of atmospheric carbon monoxide. *Science*, Band 212, 1981, S. 1389-1391
- Bates, D.R. und M. Nicolet: The photochemistry of atmospheric water vapor, *J. Geophys. Res.*, Band 55, 1950
- Bauer, K.; Conrad, R.; Seiler, W.: Photooxidative production of carbon monoxide by phytotrophic microorganisms. *Biochem. Biophys. Acta*, Band 589, 1980, S. 46-55
- Baumgartner, A.; Reichel, E.: *The World Water Balance*. R. Oldenbourg Verlag, München, 1975
- Becker, K.H.; Wirtz, K.: Gas phase reactions of alkyl nitrates with hydroxyl radicals under tropospheric conditions in comparison with photolysis. *J. Atmos. Chem.*, Band 9, 1989, S. 419-433
- Behrend, H.: Teleconnections of rainfall anomalies and of the Southern Oscillation over the entire tropics and their seasonal dependence. *Tellus* Band 39 A, 1987, S. 138-151.
- Beijer Institute: *Developing policies for responding to climate change*, Stockholm 1988
- Bener, P.: Approximate values of intensity of natural UV radiation for different amounts of atmospheric

- ozone, Final report, US Army Contract No. DAJA 37-68-C-1017, Davos, (1972)
- Bergen Ministerial Declaration on Sustainable Development in the ECE-Region vom 16. Mai 1990
- Berger, S.D. und Urbach.: A Climatology of Sunburning Ultraviolet Radiation. Photochem. Photobiol. 35, 1982, S. 187-192
- Berger, A.: The Milankovitch astronomical theory of paleo-climates: a modern review. *Vias in Astronomy* Band 24, 1980, S. 103-122
- Berz, G.: Klimaänderung: Auswirkungen auf Volkswirtschaft und Versicherungswesen. GR 42, 1990, S. 334-339
- Beyschlag, W. u. a.: Enhanced UV-B-Radiation has no effect on photosynthetic characteristics of wheat (*Triticum aestivum* L.) and wild oat (*Avena fatua* L.) under greenhouse and field conditions. *Photosynthetica* 224, 1988, S. 516-525
- Billings, W.D.: Increasing atmospheric carbon dioxide: possible effects on arctic tundra. *Oecologia*, 58, 1983, S. 286-289
- Billings, W.D.; Luken, J.O.; Martensen, D.A. und Peterson, K.M.: Arctic tundra: a sink or source for atmospheric carbon dioxide in a changing environment? *Oecologia*, 53, 1982, S. 7-11
- Billings, W.D.; Peterson K.M.; Luken, J.D. und Mortensen, D.A.: Interaction of increasing atmospheric carbon dioxide and soil nitrogen on the carbon balance of tundra microcosms. *Oecologia*, 65, 1984, S. 26-29
- Bingemer, H.G.; Crutzen, P.J.: The production of methane from solid wastes. *J. Geophys. Res.* Band 92, 1987, 2181-2187
- Binkley, C.S.: A case study of the effects of CO<sub>2</sub> induced climatic warming on forest growth and the forest sector. in: *The Impact of Climatic Variations on Agriculture*, Volume 1. Parry, Carter, Konijn (Hrsgs.); Reidel, Dordrecht, 1988
- Bird, E.C.F.: *Shoreline Changes during the Past Century: Proceedings 23rd International Geographical Congress*, Moskau, Pergamon Press, New York, 1976
- Blake, D.R.; Rowland, F.S.: Continuing world-wide increase in tropospheric methane, 1978-1987. *Science*, Band 239, 1988, S. 1129-1131
- Blumthaler, M. und W. Ambach: Indication of Increasing Solar Ultraviolet-B radiation Flux in Alpine Regions. *Science*, 248, 1990, S. 206 1990
- BMU: Beschluß des Bundeskabinetts vom 30.5.1990; Verordnung zum Verbot von bestimmten, die Ozonschicht abbauenden Halogenkohlenwasserstoffen. EK-Drs. 11/142
- BMU: Umweltpolitik-Bericht der Bundesregierung an den Deutschen Bundestag über die Erfüllung international eingegangener Verpflichtungen zur Reduzierung der Luftverunreinigung, Bonn 1990
- Bochow, T. W., S. K. West, A. Azar, B. Munos, A. Sommes und H. R. Taylor: Ultraviolet light exposure and the risk of posterior subcapsular cataract. *Archiv Ophthalmol.*, 107, 1989, S. 369-372
- Bojkov, R.D.: The 1979-1985 ozone decline in the Antarctic as reflected in ground-based observations. *Geophys. Res. Lett.*, 13, 1986, S.1236
- Bojkov, R.D.: Ozone changes at the surface and in the free troposphere. In: *Tropospheric ozone*, Isaksen, ISA. (Hrsg.) NATO ASI, Series C., Band 227, Reidel Publishing Comp., Dordrecht, 1988, S. 83-96
- Bolin, B.: Carbon cycle modelling. *SCOPE* 16, John Wiley, 1981
- Bolin, B.; Björkström, A.; Holmen, K.; Moore, B.: The simultaneous use of tracers for ocean circulation studies. *Tellus* Band 35 B, 1983, S. 206-236
- Bolin, B.: How much CO<sub>2</sub> will remain in the atmosphere? In „*The Greenhouse Effect, Climatic Change and Ecosystems*“, Bolin B.; Döös B.R.; Jäger J.; Warrick R.A. (Hrsg.), *SCOPE* 29, John Wiley and Sons, Chichester, England, 1986, S. 93-155
- Bolin, B.; Döös, B.R.; Jäger, J.; Warrick, R.A.: *The Greenhouse Effect, Climatic Change and Ecosystems*, SCOPE-Report No. 29, John Wiley and Sons, Chichester, England, 1986, pp. 541
- Bolle, H.-J.; Seiler, W.; Bolin, B.: Other greenhouse gases and aerosols.-Assessing their role for atmospheric radiative transfer. In „*The Greenhouse Effect, Climate Change, and Ecosystems*“, *SCOPE* 29, B. Bolin, B.R. Döös, J. Jäger und R.A. Warrick (Hrsg.), John Wiley and Sons, New York, 1986, S. 157-203
- Bonsang, B.; Kanakidou, M.; Lambert, G.; Monfray, P.: The marine source of C<sub>2</sub>-C<sub>6</sub> aliphatic hydrocarbons. *J. Atmos. Chem.*, Band 6, 1988, S. 3-20
- Böttger, A.; Ehhalt, D.H.; Gravenhorst, G.: Atmosphärische Kreisläufe von Stickoxiden und Ammoniak. KFA-Report 1558, 1978
- BR-Drucksache 162/90: Mitteilung der Kommission der Europäischen Gemeinschaften an den Rat über „Energie und Umwelt“, Bonn, den 28.02.1990
- BR-Drucksache 247/90: Vorschlag einer Verordnung (EWG) des Rates über Stoffe, die zu einem Abbau der Ozonschicht führen, KOM (90) endg.; Ratsdok 4451/90, Bonn, den 4.4.90
- Bradley, R.S. u. a.: Precipitation fluctuations over Northern Hemisphere land areas since the mid-19th century, *Science* Band 237, 1987, S. 171-175
- Brandt, Willy: „Brandt will Reform internationaler Organisationen“, in: *Bonner Generalanzeiger* vom 22. Juli 1989
- Brasseur, G. und S. Solomon: *Aeronomy of the Middle Atmosphere*. D. Reidel Publishing Company, 1984
- Brasseur, G. und A. DeRudder: The potential impact on atmospheric ozone and temperature of increasing trace gas concentrations. *J. Geophys. Res.*, 92, 1987, S. 10903-10920
- Brasseur, G.; De Rudder, A.: The potential impact on atmospheric ozone and temperature of increasing

- trace gas concentrations. *J. Geophys. Res.* Band 92, 1987, S. 10903-10920
- Brasseur, G. M. H. Hitchman; S. Walters; M. Dymek; E. Falise und M. Pirre: An interactive chemical dynamical radiative two-dimensional model of the middle atmosphere. *J. Geophys. Res.*, 95, 1990, S. 5639-5656
- Braß, Heiko: Enquete-Kommissionen im Spannungsfeld von Politik, Wissenschaft und Öffentlichkeit, in: Petermann, Thomas (Hrsg.): Das wohlberatene Parlament, Berlin 1990, S.65-95
- Broadus, J.M.; Millman, J.D.; Edwards, S.F.; Aubrey, D.G. und Gable, F.: Rising Sea level and Damming of Rivers: Possible Effects in Egypt and Bangladesh. in: Effects of Changes in Stratospheric Ozone and Global Climate. Titus (Hrsg.), EPA und UNEP, Washington, D.C., 1986
- Broecker, W.S.; Denton, G.H.: What drives glacial cycles? *Scientific American*, January 1990, S. 43-50
- Bromley, D.Allen: Präventivmaßnahmen gegen Treibhauseffekt. Rede vor dem National Press Club am 11. April 1990
- Browell, E.V. u. a.: Airborne Lidar Observations in the wintertime arctic stratosphere: Ozone. *Geophys., Res. Lett.*, 17, 4, 1990, S.325-328
- Brown, L.R.: Zur Lage der Welt 89/90, World-Watch Institute Report, S. Fischer, Frankfurt, 1990
- Brühl, C.: Ein effizientes Modell für globale Klima- und Luftzusammensetzungsänderungen durch menschliche Aktivitäten. Dissertation, Universität Mainz, 1987
- Brühl, C. und Crutzen, P.J.: On the Disproportionate Role of Tropospheric Ozone as a Filter against Solar UV-B Radiation. *Geophysical Research Letters*, 16, No. 7, 1989, S. 703-706
- Brühl, C. und P. J. Crutzen: Scenarios of possible changes in atmospheric temperatures and ozone concentrations due to man's activities, estimated with a one-dimensional coupled photochemical climate model. *Climate Dynamics*, 2, 1988, S. 173-203
- Brühl, C.; Crutzen, P. J.: Scenarios of possible changes in atmospheric temperatures and ozone concentrations due to man's activities, estimated with a one-dimensional coupled photochemical climate model. *Climate Dynamics Band 2*, 1988, S. 173-203
- Brühl, C. und P. J. Crutzen: On the disproportionate role of tropospheric ozone as a filter against solar UV-B radiation. *Geophys. Res. Lett.*, 16, 1989, S. 703-706
- Brühl, C.; Crutzen, P.J.: On the disproportionate role of tropospheric ozone as a filter against solar UV-B radiation. *Geophys. Res. Lett.*, Band 16, 1989, S. 703-706
- Brühl, C. und P. J. Crutzen: Ozone and climate changes in the light of the Montreal protocol, a model study. Eingereicht bei Ambio, 1990
- Brühl, C. und R. Hennig: Analyse und Bewertung der Modellsysteme zur Vorhersage von Veränderungen des Ozongehalts der Atmosphäre. Zwischenbericht FE-Vorhaben 104 02 521. Umweltbundesamt, Berlin/Mainz, 1989
- Brunke, E.-G.; Scheel, H.E.; Seiler, W.: Trends of tropospheric CO, N<sub>2</sub>O and CH<sub>4</sub> as observed at Cape Point, South Africa. *Atmos. Environ.*, Band 24A, 1990, S. 585-595
- BT-Drucksache 8/4341: Deutscher Bundestag (Hrsg.), „Zukünftige Kernenergiepolitik“, Bonn 1980
- BT-Drucksache 11/533: Antrag der CDU/CSU-Fraktion und der Fraktion der FDP „Einsetzung einer Enquete-Kommission ‚Vorsorge zum Schutz der Erdatmosphäre‘“, Bonn, den 24.06.87
- BT-Drucksache 11/678: Antrag der SPD-Fraktion „Schutz der Ozonschicht durch Verbot des Einsatzes von Fluorchlorkohlenwasserstoffen (FCKW)“, Bonn, den 07.08.87
- BT-Drucksache 11/787: Antrag der Fraktion DIE GRÜNEN „Einsetzung einer Enquete-Kommission ‚Langfristiger Klimaschutz‘“, Bonn, den 14.09.87
- BT-Drucksache 11/788: Antrag der Fraktion DIE GRÜNEN „Klimaschutzprogramm: Sofortmaßnahmen gegen den Abbau der Ozonschicht und die Auswirkungen des Treibhauseffektes“, Bonn, den 14.09.87
- BT-Drucksache 11/971: Beschlußempfehlung und Bericht des Ausschusses für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit (21. Ausschluß) zum Antrag der CDU/CSU-Fraktion und der Fraktion der FDP „Einsetzung einer Enquete-Kommission ‚Vorsorge zum Schutz der Erdatmosphäre‘“ (BT-Drucksache 11/533) und zum Antrag der Fraktion DIE GRÜNEN „Einsetzung einer Enquete-Kommission ‚Langfristiger Klimaschutz‘“ (BT-Drucksache 11/787), Bonn, den 15.10.87
- BT-Drucksache 11/2271: Gesetzentwurf der Bundesregierung-Entwurf eines Gesetzes zu dem Übereinkommen vom 22. März 1985 zum Schutz der Ozonschicht (Wiener Übereinkommen), Bonn, den 06.05.1988
- BT-Drucksache 11/2676: Gesetzentwurf der Bundesregierung-Entwurf eines Gesetzes zu dem Montrealer Protokoll vom 16. September 1987 über Stoffe, die zu einem Abbau der Ozonschicht führen, Bonn, den 15.07.1988
- BT-Drucksache 11/4133: Erste Beschlußempfehlung und Bericht des Ausschusses für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit zu dem Ersten Zwischenbericht der Enquete-Kommission „Vorsorge zum Schutz der Erdatmosphäre“. Bonn, 8.03.1989
- BT-Drucksache 11/7119 Antwort der Bundesregierung auf die kleine Anfrage der Abg. Fr. Garbe und der Fraktion DIE GRÜNEN: Zwang zum Einsatz von FCKW durch DIN-Normen, Bonn 30.05.1990
- Bultot, F. und Gellens, D.: Simulation of the impact of CO<sub>2</sub> atmospheric doubling on precipitation and evapotranspiration-study of the sensitivity to various hypotheses. *Conf. Climate and Water*. Helsinki, Vol 1, 1989, S. 73-92

- Burke, R.A.; Barber, T.R.; Sackett, W.M.: Methane flux and stable hydrogen and carbon isotope composition of sedimentary methane from the Florida Everglades. *Global Biogeochem. Cycles*, Band 2, 1988, S. 329-340
- Butler, J.H.; Elkins, J.W.; Thompson, T.M.; Egan, K.B.: Tropospheric and dissolved N<sub>2</sub>O of the West Pacific and East Indian oceans during the El-Niño/Southern Oscillation event of 1987. *J. Geophys. Res.*, im Druck
- Caldwell, M. M.; L. B. Camp; C. W. Warner und S. D. Flint: Stratospheric Ozone Reduction. in: *Solar Ultraviolet Radiation and Plant Life*. R. C. Worrest; M. M. Caldwell (Hrsg.), Springer 1986
- Caldwell, M. M.; S. Madronich; L. O. Björn und M. Ilyas: Ozone reduction and increased ultraviolet radiation. *UNEP Environmental Effects Report*, Chapter 1, 1989, S. 1-10
- Callis, L. B.; M. Natarajan und R. E. Boughner: On the relationship between greenhouse effect, atmospheric photochemistry, and species distribution. *J. Geophys. Res.*, 88, 1983, S. 1401-1426
- Callis, L.B.; Natarajan, M.I.; Boughner, R.E.: On the relationship between greenhouse effect, atmospheric photochemistry, and species distribution. *J. Geophys. Res.* Band 38, 1988, S. 1401-1426
- Cariolle, D.; A. Lasserre-Bigorry; J.-F. Royer, J.-F. Geleyn: A general circulation model simulation of the springtime Antarctic ozone decrease and its impact on midlatitudes. *J. Geophys., Res.* 95, 1990, S. 1883-1898
- Cavanaugh, L.A.; Schadt, C.F.; Conrad, F.; Robinson, E.: Atmospheric hydrocarbon and carbon monoxide measurements at Point Barrow, Alaska. *Environ. Sci. Technol.*, Band 3, 1969, S. 251-257
- Caviedes, C.: Report of the Climate and Fisheries Workshop. H. Glantz (Hrsg.), NCAR, Boulder Colorado, 1989
- Chappelaz, J.; Barnola, J.M.; Raynaud, D.; Korotkevich, Y.S.; Lorius, C.: Ice-core record of atmospheric methane over the past 160,000 years. *Nature*, Band 345, 1990, S. 127-131
- Chatfield, R.B.; Gardner, E.P.; Calvert, J.G.: Sources and sinks of acetone in the troposphere: Behavior of reactive hydrocarbons and a stable product. *J. Geophys. Res.*, Band 92, 1987, S. 4208-4216
- Chemical Manufactures Association (CMA), Fluorocarbon Programm Panel: 1988 Production and Sales of Chlorofluorocarbons 11 and 12. October 1989
- Chubachi, S.: Preliminary result of ozone observations at Syowa Station from February, 1982 to January, 1983. *Mem. Natl. Inst. Polar Res.*, 34, 1984, S.13
- Cicerone, R.; Oremland, R.: Biogeochemical aspects of atmospheric methane. *Global Biogeochem. Cycles*, Band 2, 1988, S. 299-327
- Cicerone, R.J.: Analysis of sources and sinks of atmospheric nitrous oxide (N<sub>2</sub>O). *J. Geophys. Res.*, Band 94, 1989, S. 18265-18271
- Coakley, J.A.; Bernstein, R.L.; Durkee, P.A.: Effect of ship stack effluents on cloud reflectivity. *Science* Band 237, 1987, S. 1020-1022
- Commonwealth Secretariat: *Climate Change: Meeting the Challenge*. Report by a Commonwealth group of Experts, London, 1989
- Conrad, R.; Seiler, W.: Arid soils as a source of atmospheric carbon monoxide. *Geophys. Res. L.*, Band 9, 1982, S. 1353-1356
- Conrad, R.; Seiler, W.: Influence of temperature, moisture, and organic carbon on the flux of H<sub>2</sub> and CO between soil and atmosphere: field studies in subtropical regions. *J. Geophys. Res.*, Band 90, 1985, S. 5633-5709
- Conrad, R.; Seiler, W.; Bunse G.: Factors influencing the loss of fertilizer-nitrogen into the atmosphere as N<sub>2</sub>O. *J. Geophys. Res.*, Band 88, 1983, S. 6709-6718
- Conway, T.J. u. a.: Atmospheric carbon dioxide measurements in the remote global troposphere, 1981-1984. *Tellus*, Band 40B, 1988, 81-115
- Crill, P.M. u. a.: Methane flux from Minnesota peatlands. *Global Biogeochem. Cycles*, Band 2, 1988, S. 371-384
- Crutzen, P.J.: The influence of nitrogen oxides on the atmospheric ozone content. *Q.J.R. Meteorol. Soc.* 96, 1970, S. 320
- Crutzen, P.J.: Ozone production rates in an oxygen-hydrogen-nitrogen oxide atmosphere. *J. Geophys. Res.*, 76, 1971, S. 7311-7327
- Crutzen, P.J.: A discussion of the chemistry of some minor constituents in the stratosphere and troposphere. *Pure Appl. Geophys.*, Band 106-108, 1973, S. 1385-1399
- Crutzen, P.J.: Photochemical reactions initiated by and influencing ozone in unpolluted tropospheric air. *Tellus*, Band 26, 1974, S. 47-57
- Crutzen, P.J.: The role of NO and NO<sub>2</sub> in the chemistry of the troposphere and stratosphere. *Ann. Rev. Earth Planet. Sci.*, Band 7, 1979, S. 443-472
- Crutzen, P.J.: Role of the tropics in atmospheric chemistry. In *„The Geophysiology of Amazonia“*, R.E. Dickinson (Hrsg.), John Wiley, New York, 1987, S. 107-130
- Crutzen, P.J.: Tropospheric ozone: an overview, In *„Tropospheric Ozone-Regional and Global Scale Interactions“*. I.S.A. Isaksen (Hrsg.), NATO ASI Series C, Band 227, Reidel Publishing comp., Dordrecht, Holland, 1988, S. 3-32
- Crutzen, P. J.; I. S. A. Isaksen und J. R. McAfee: The impact of the chlorocarbon industry on the ozone layer. *J. Geophys. Res.*, 83, 1978, S. 345-363
- Crutzen, P.J.; Heidt, L.E.; Krasnec, J.P.; Pollock, W.H.; Seiler, W.: Biomass burning as a source of atmospheric gases CO, H<sub>2</sub>, N<sub>2</sub>O, NO, CH<sub>3</sub>Cl, and COS. *Nature*, Band 282, 1979, S. 253-256

- Crutzen, P. J. und U. Schmailzl: Chemical budgets of the stratosphere. *Planetary & Space Sci.*, 31, 1983, S. 1009-1032
- Crutzen, P.J.; Gidel, L.T.: A two-dimensional photochemical model of the atmosphere.-2: The tropospheric budgets of the anthropogenic chlorocarbons, CH<sub>3</sub>Cl, CH<sub>4</sub>, CH<sub>3</sub>Cl and the effects of various NO<sub>x</sub> sources on tropospheric ozone. *J. Geophys. Res.*, Band 88, 1983, S. 6641-6661
- Crutzen, P.J. u. a.: Tropospheric chemical composition measurements in Brazil during the dry season. *J. Atmos. Chem.*, Band 2, 1985, S. 233-256
- Crutzen, P.J.; Aselmann, I.; Seiler, W.: Methane production by domestic animals, wild ruminants, other herbivorous fauna, and humans. *Tellus*, Band 38B, 1986, S. 271-284
- Cunnold, D.; F. Alyea; N. Phillips und R. Prinn: A three dimensional dynamical-chemical model for atmospheric ozone. *J. Atmos. Sci.*, 32, 1975, S. 170-194
- Cunnold, D. u. a.: The atmospheric lifetime experiment, 3. Lifetime methodology and application to three years of CFCl<sub>3</sub> data. *J. Geophys. Res.* Band 88, 1983, S. 8379-8400
- Czakainski, Martin und Hans Michaelis: 14. Weltenergiekonferenz-Tendenzen, Ergebnisse, Bewertungen, in: *Energiewirtschaftliche Tagesfragen* 11/1989
- Danielsen, E.F.; Mohnen, V.A.: Project Dustorm report: Ozone transport, in situ measurements, and meteorological analyses of tropopause folding. *J. Geophys. Res.*, Band 82, 1977, S. 5867-5878
- Dawson, G.A.; Farmer, J.C.; Moyers, J.L.: Formic and acetic acids in the atmosphere of the Southwest U.S.A. *Geophys. Res. L.*, Band 7, 1980, S. 725-728
- Dawson, G.A.; Farmer, J.C.: Soluble atmospheric trace gases in the Southwestern United States. 2. Organic Species HCHO, HCOOH, CH<sub>3</sub>COOH. *J. Geophys. Res.*, Band 93, 1988, S. 5200-5206
- De Fabo, E. C. und F. P. Noonan: Mechanisms of immune suppression by ultraviolet irradiation in vivo. Part I: Evidence for the existence of a unique photoreceptor in skin and its role in photoimmunology. *Journal of Experimental Medicine*, 157, 1983, S. 84-98
- Dehne, K.: Zur Variation von Absolut- und Relativwerten der UV-Globalstrahlung, Abs. 3.2ff. in: *Wirkungen von UV-B-Strahlung auf Pflanzen und Tiere* (2. Franz-Ruttner-Symposium), Laufener Seminarbeiträge 3(88), Akademie für Naturschutz und Landschaftspflege, 1989
- Delany, A.C.; Crutzen, P.J.; Haagenson, P.; Walters, S.; Wartburg, A.F.: Photochemically produced ozone in the emissions from large-scale tropical vegetation fires. *J. Geophys. Res.*, Band 90, 1985, S. 2425-2429
- Delft Hydraulics Laboratory: Sea level rise: a worldwide cost estimate of basic control defence measures. Bericht an IPCC, 1990
- DeMore, W. B.; J. J. Margitan; M. J. Molina; R. T. Watson; D. M. Golden; R. F. Hampson; R. F. Kurylo; C. J. Howard und A. R. Ravishankara: Chemical kinetics and photochemical data for use in stratospheric modeling. *Jet Prop. Lab. Publ.* 85-37, 7, NASA, Pasadena, CA, 1985
- DeMore, W. B.; M. J. Molina; S. P. Sander; D. M. Golden; R. F. Hampson; R. F. Kurylo; C. J. Howard und A. R. Ravishankara: Chemical kinetics and photochemical data for use in stratospheric modeling. *Jet Prop. Lab. Publ.* 87-41, 8, NASA, Pasadena, CA, 1987
- Deutscher Bundestag: Stenographischer Bericht der 131. Sitzung (Plenarprotokoll 11/131), Bonn, den 09.03.89, 9586C-9607A
- Deutscher Bundestag: Stenographischer Bericht der 34. Sitzung (Plenarprotokoll 11/34), Bonn, den 16.10.87, 2296 D
- Dianov-Klokov, V.I.; Fokeeva, E.V.; Yurganov, Y.L.: The investigation of the abundance of atmospheric carbon monoxide. *Proc. Acad. Sci.*, UdSSR Band 14, 1978, S. 366-377
- Diaz, H.F.; Bradley, R.S.; Eischeid, J.K.: Precipitation Fluctuations over global land areas since the late 18s. *J. Geophys. Res.* Band 94, 1989, S. 1159-1210
- Dickson, C.; Meincke, J.; Malmberg, R. und Lee, G.: The great salinity anomaly in the Northern North Atlantic. *Progr. Oceanography*, 20, 1984, S. 2
- Dickinson, R. E.; Cicerone, R. J.: Future global warming from atmospheric trace gases. *Nature* Band 319, 1986, S. 109-115
- Dignon, J.; Hameed, S.: Global emissions of nitrogen and sulphur oxides from 1860 to 1980. *J. Air Pollut. Contr. Assoc.* Band 39, 1989, S. 180-186
- Dobson, A.: Climate Change and Parasitic Diseases of Man and Domestic Livestock in the United States. in: *Coping with Climate Change*. Topping, Jr. (Hrsg.), Climate Institute, Washington, D.C., 1989
- Döhler, G.: Impact OF UV-B-Radiation On Photosynthetic Assimilation Of 14C-Bicarbonate And Inorganic 15N-Compounds By Cyanobacteria. *Z. Naturforsch.*, 41C, 1986, S. 426-432
- Dulson, W.: Organisch-chemische Fremdstoffe in atmosphärischer Luft.-Gaschromatographisch-massenspektrometrische Submikrobestimmung und Bewertung von Luftverunreinigungen in einer Großstadt. *Schriftenreihe des Vereins für Wasser-, Boden- und Lufthygiene*, Band 47, A. Heller (Hrsg.), Gustav Fischer Verlag, Stuttgart, 1978, S. 1-128
- Dütsch, H. U.: Vertical ozone distribution on a global scale. *Pure and Applied Geophysics*, 116, 1978, S. 511-529
- Dvoryashina, E.V.; Dianov-Klokov, V.I.; Yurganov, Y.L.: Ergebnisse von Messungen der Verteilung von Kohlenmonoxid bei Svenigorod, 1970-1982. Vorabdruck der Akademie der Wissenschaften der UdSSR, Moskau, 1982 (in Russisch)
- Dvoryashina, E.V.; Dianov-Klokov, V.I.; Yurganov, Y.L.: Über die Variationen der atmosphärischen Gesamtsäulendichte von Kohlenmonoxid für 1970-1982.

Iswestia, UdSSR, Atmosphärische und Ozeanische Physik Band 20, 1984, S. 40-47 (in Russisch)

Easmus, D. und Jarvis, P.G.: Direct effects of CO<sub>2</sub> increases on trees and forests (natural and commercial) in the UK. Adv. Ecol. Res., 1989

Ebel, W.: Stromverbrauch im Haushalt. Institut Wohnen und Umwelt, Darmstadt 1989

Ebenroth, Carsten Thomas: Zur Bedeutung der Multilateral Investment Guarantee Agency für den internationalen Ressourcentransfer, in: Juristen-Zeitung 13/1987, S. 646

ECETOC: Joint Assessment of Commodity Chemicals, 9, Chlorodifluoromethane, CAS: 75-45-6, 1989

ECH (Energieconsulting Heidelberg): Potentiale der Kraft-Wärme-Kopplung, Heidelberg 1989

EG-Kommission: Der Treibhauseffekt und die Gemeinschaft-Mitteilung an den Rat, Kom (88) 656, Brüssel, den 16.11.1988

EG-Kommission: Mitteilung der Kommission an den Rat: Die politischen Zielsetzungen der Gemeinschaft zum Treibhauseffekt, SEK (90), 495 endg., Ratsdok.-Nr. 5557/90

Ehhalt, D.H.; Drummond, J.W.: The tropospheric cycle of NO<sub>x</sub>. In „Chemistry of the Unpolluted and Polluted Troposphere“, H.W. Georgii und W. Jäschke (Hrsg.), D. Reidel, Hingham, Massachusetts, U.S.A., 1982, S. 219-251

Ehhalt, D.H.; Drummond, J.W.: NO<sub>x</sub> sources and the tropospheric distribution of NO<sub>x</sub> during STRATOZ III. In „Tropospheric Ozone“, Isaksen, I.S.A. (Hrsg.). D. Reidel Publ. Comp. Dordrecht, Holland, 1988, S. 217-237

EK „Technologiefolgen-Abschätzung und Bewertung“: Perspektiven zur Zukunft der Landwirtschaft (Agrarpfade). Studie des ISP-Eduard Pestel Institut für Systemforschung Hannover und der FG Umweltsystemanalyse der Universität/GhK Kassel im Auftrag der Enquete-Kommission „Technikfolgen-Abschätzung und Bewertung“ des 11. Deutschen Bundestages

EK-Vorsorge zum Schutz der Erdatmosphäre: Schutz der Erdatmosphäre — Eine internationale Herausforderung. Zwischenbericht der Enquete-Kommission des 11. Deutschen Bundestages „Vorsorge zum Schutz der Erdatmosphäre“, 3. Auflage, Bonn/Karlsruhe 1990; erschienen im Economica Verlag, Verlag C.F. Müller, auch veröffentlicht

in der Schriftenreihe des Deutschen Bundestages „Zur Sache“ 5/88, 1. und 2. Auflage, in BT-Drucksache 11/3246, englische Ausgabe unter dem Titel: Protecting the Earth's Atmosphere: An International Challenge; Interim Report of the Enquete-Commission „Preventive Measures to Protect the Earth's Atmosphere“ of the 11th German Bundestag, Bonn, German Bundestag, 1989

EK-Vorsorge zum Schutz der Erdatmosphäre: Schutz der Tropenwälder — Eine internationale Schwerpunktaufgabe, Zweiter Bericht der Enquete-Kommission des 11. Deutschen Bundestages „Vorsorge zum Schutz der Erdatmosphäre“, Bonn/Karlsruhe 1990; erschienen im Economica Verlag, Verlag C.F. Müller, auch veröffentlicht in der Schriftenreihe des Deutschen Bundestages „Zur Sache“ 10/90 sowie in BT-Drucksache 11/7220, englische Ausgabe unter dem Titel: Protecting the Tropical Forests: A High-Priority International Task; 2nd Report of the Enquete-Commission „Preventive Measures to Protect the Earth's Atmosphere“ of the 11th German Bundestag, Bonn, German Bundestag, 1990

EK-Vorsorge zum Schutz der Erdatmosphäre: Energie und Klima-Studienprogramm „Internationale Konvention zum Schutz der Erdatmosphäre sowie Vermeidung und Reduktion energiebedingter klimarelevanter Spurengase“, Band 1: Einführung, Problemkreis Energie und Klima, Band 2: Energieeinsparung und rationelle Energienutzung und -umwandlung, Band 3: Erneuerbare Energien, Band 4: Fossile Energieträger, Band 5: Kernenergie, Band 6: Energiespeicherung und Energiesysteme, Band 7: Konzeptionelle Fortentwicklung des Verkehrsbereichs, Band 8: Energieszenarien, Teil I: Weltweite Energieszenarien, Teil II: Referenzszenarien für die Bundesrepublik Deutschland, Band 9: Internationale Konvention zum Schutz der Erdatmosphäre-Untersuchung für völkerrechtliche Vereinbarungen zur Reduktion der Emmissionen energiebedingter klimarelevanter Spurengase, Band 10: Energiepolitische Handlungsmöglichkeiten und Forschungsbedarf, Bonn/Karlsruhe 1990 erschienen im Economica Verlag, Verlag C.F. Müller, Bonn 1990

Elkins, J.W.; Rosen, R.: Summary report 1988: Geophysical monitoring for climatic change. NOAA-ERL, Boulder, Colorado, 1989

Elliott, W.P.; Smith, M.E.; Angell, J.K.: On monitoring tropospheric water vapour changes using radiosonde data. Proc. Workshop on Greenhouse Gas Induced Climate Change, Amherst, Massachusetts, Mai 1989, Elsevier, im Druck

Elmets C. A., P. R. Bergstresser, R. E. Tiegelaar, P. J. Wood und J. W. Streilein: Analysis of the mechanism of unresponsiveness produced by haptens painted on skin exposed to low dose ultraviolet radiation. Journal of Experimental Medicine, 158, 1983, S. 781-794

Elsaesser, H.W; Harries, J.E., Kley, D., Penndorf, R.: Stratospheric H<sub>2</sub>O. Planet. Space Sci. Band 28, 1980, S. 827-835

Emanuel, K.A.: The dependence of hurricane intensity on climate. Nature, 326, 1987, S. 483-485

Emanuel, R.E.; Killough, G.G.; Post W.M.; Shugart, H.H.: Modeling terrestrial ecosystems in the global



- carbon cycle with shifts in carbon storage capacity by land-use change. *Ecology* Band 65, 1984, S. 970-983
- Emanuel, W.R.; Shugart, H.H. und Stevenson M.P.: Climate change and the broadscale distribution of terrestrial ecosystem complexes. *Climate Change*, 7, 1985, S. 29-43
- Endo, M. u. a.: Effects of the interception of near ultraviolet radiation on nitrifier activity and nitrification process in a fertilized andosol under field conditions. *Soil Science and Plant Nutrition* 32, 1986, S. 365-372
- Energy Statistics Yearbook, United Nations, New York 1986 und Energy Balances, OECD 1984/1986.
- Enting, I.G.; Mansbridge, J.V.: Seasonal sources and sinks of atmospheric CO<sub>2</sub>: Direct inversion of filtered data. *Tellus*, Band 41 B, 1989, S. 111-126
- Enting, I.G.; Pearman, G.I.: Description of a one-dimensional carbon cycle model calibrated using techniques of constrained inversion. *Tellus* Band 39 B, 1987, S. 459-476
- EPA: The potential Effects of Global Climate Change on the United States, Report to Congress, 1989
- EPA: Ultraviolet radiation and melanoma-with a special focus on assessing the risks of ozone depletion. Vol. 4, J. D: Longstraph (Hrsg.), EPA 400/1-87/00 1d, U. S. Environmental Protection Agency, Washington D.C. 1987
- Eppley, R.W., und Peterson, B.J.: Particulate organic matter flux and planktonic new production in the deep ocean. *Nature*, Band 282, 1979, S. 677-680
- Erklärung des Bundeskanzlers zum Abschluß des Wirtschaftsgipfels, in: Presse- und Informationsamt der Bundesregierung (Hrsg.), Wirtschaftsgipfel Paris (Bulletin Nr. 76), Bonn, den 19. Juli 1989, S. 672
- Esser, G.: Sensitivity of global carbon pools und fluxes to human and potential climate impacts. *Tellus* Band 39 B, 1987, S. 245-260
- Etheridge, D.M.; Pearmann, G.I.; de Silva, F.: Atmospheric trace gas variations as revealed by air trapped in an ice core from Law Dome, Antarctica. *Ann. Glaciology* Band 10, 1988, S. 28-33
- Evangelischer Pressedienst: Club of Rome fordert Nord-Süd-Konferenz und UN-Umweltschutzrat, Frankfurt/Main, den 15. Juni 1989
- Fabian, P.; Pruchniewicz, P.G.: Meridional distribution of ozone in the troposphere and its seasonal variations. *J. Geophys. Res.*, Band 82, 1977, S. 2063-2073
- Farber, S. und Costanza, R.: The economic value of wetland systems. *J. of Environm. Management*, 24, 1986, S. 41-51
- Farman, J.C.; B.G. Gardiner und J.D. Shanklin: Large losses of total ozone in Antarctica reveal seasonal ClO<sub>x</sub>/NO<sub>x</sub> interaction. *Nature*, 315, 1985
- Feely, R.A. u. a.: Distribution of chemical tracers in the Eastern Equatorial Pacific during and after the 1982-1983 El-Niño/Southern Oscillation event. *J. Geophys. Res.*, Band 92, 1987, S. 6545-6558
- Fehsenfeld, F.C.; Bollinger, M.J.; Liu, S.C.; Parrish, D.D.; McFarland, M.; Trainer, M.; Kley, D.; Murphy, P.C.; Albritton, D.L.: A study of ozone in the Colorado Mountains. *J. Atmos. Chem.*, Band 1, 1983, S. 87-105
- Fehsenfeld, F.C.; Parrish, D.W.; Fahey, D.W.: The measurements of NO<sub>x</sub> in the nonurban troposphere. In „Tropospheric ozone: Regional and global scale interactions“, I.S.A. Isaksen (Hrsg.), D. Reidel Publishing Co., Boston, Massachusetts, 1988, S. 185-217
- Feist, W., Werner, J.: Niedrigenergiehaus Schrekensbach. Institut Wohnen und Umwelt, Darmstadt 1988, S. 27 f.
- Feister, U.; Warmbt, W.: Long-term measurements of surface ozone in the German Democratic Republic. *J. Atmos. Chem.* Band 5, 1987, S. 1-21
- Financial Times (No. 31,168) vom 8. Juni 1990
- Fisher, D. A.; C. H. Hales; D. L. Filkin; M. K. W. Ko; N. D. Sze; P. S. Connell; D. J. Wuebbles; I. S. A. Isaksen und F. Stordal: Model calculations of the relative effects of CFCs and their replacements on stratospheric ozone. *Nature* 344, 1990, S. 508-512
- Fisher, D.A.; C.H. Hales; W.-C. Wang, M.K.W. Ko und N.D. Sze: Model calculations of the relative effects of CFCs and their replacements on globale warming. *Nature*, 344, 1990, S. 513-516
- Fishman, J.: Ozone in the troposphere. In „Ozone in the Free Atmosphere“, Kapitel 4, R.C. Whitten and S. S. Prasad (Hrsg.), van Nostand, New York, 1985, S. 161-194
- Fishman, J.; Solomon, S.; Crutzen, P.J.: Observational and theoretical evidence in support of a significant in situ photochemical source of tropospheric ozone. *Tellus*, Band 31, 1979, S. 432-446
- Fishman, J.; Watson, C.E.; Larsen, J.C.; Logan, J.A.: The distribution of tropospheric ozone obtained from satellite data. *J. Geophys. Res.*, im Druck
- Flohn, H.: Treibhauseffekt der Atmosphäre: neue Fakten und Perspektiven, Leo-Brandt-Vortrag, 27. Sept. 1989, Rheinisch-Westfälische Akademie der Wissenschaften, Westdeutscher Verlag, Opladen, 1989
- Flohn, H.; Kapala, A.; Knoche, H.R. und Möchel, H.: Recent changes of the tropical water and energy budget and of mid-latitude circulations. *Climate Dynamics*, 5, 19.
- Flohn, H.: Welt-Klima-Konferenz: Wechselwirkungen von Klima und Wirtschaft-Klima-Anomalien-Rolle des Kohlendioxids-Energie- und Umweltprobleme, in: Vereinte Nationen 3/1979
- Food and Agriculture Organisation of the United Nations (FAO): Land, Food and People. Rom, 96 Seiten, 1984
- Fraser, P.J. u. a.: Carbon monoxide in the Southern Hemisphere. *Proc. 7th World Clean Air Congr.*, Band 2, 1986, S. 341-352
- Fraser, P.J.; Hyson, P.; Rasmussen, R.A.; Crawford, A.J.; Khalil, M.A.K.: Methane, carbon monoxide and

- methylchloroform in the Southern Hemisphere. *J. Atmos. Chem.*, Band 4, 1986, S. 3-42
- Fraser, P.J.; Khalil, M.A.K.; Rasmussen, R.A.; Steele, L.P.: Tropospheric methane in the mid-latitudes of the southern hemisphere. *J. Atmos. Chem.*, Band 1, 1984, S. 125-135
- Fraunhofer-Institut für Systemtechnik und Innovationsforschung, Karlsruhe, G. Angerer: Halone-Verwendung, Freisetzung, Emissionsminderung. FhG/ISI-Vorhaben 104930, 1988, S. 6
- Friedli, H.; Loetscher, H.; Oeschger, H.; Siegenthaler, U.; Stauffer, B.: Ice core record of the  $^{13}\text{C}/^{12}\text{C}$  ratio of atmospheric  $\text{CO}_2$  in the past two centuries. *Nature*, Band 324, 1986, S. 237-238
- Friedman, D.G.: Implications of Climate Change for the Insurance Industry. in: *Coping with Climate Change*, Topping Jr. (Hrsg.), Climate Institute, Washington, D.C., 1989
- Friedrich, u. a., Externe Kosten der Stromerzeugung, Frankfurt/M. 1989
- Fritsche, U., Seifried, D.: Klimaschutz-Konzeption für das Land Hessen im Bereich Energie, Freiburg, Darmstadt, 1990
- Galbally, I.E.: Factors controlling  $\text{NO}_x$  emissions from soils. In „Exchange of trace gases between terrestrial ecosystems and the atmosphere“, John Wiley and Sons, New York, 1989, S. 23-27
- Galbally, I.E.; Roy, C.R.: Destruction of ozone at the earth's surface. *Quart. J. Roy. Meteorol. Soc.*, Band 106, 1980, S. 599-620
- Garcia, R.R. und S. Solomon: Interannual variability in Antarctic ozone and the Quasi-Biennial Oscillation. *Geophys. Res. Lett.*, 14, 1987, S. 848
- Garcia, R. und S. Solomon: A numerical model of zonally averaged dynamical and chemical structure of the middle atmosphere. *J. Geophys. Res.*, 88, 1983, S. 1379-1400
- Gidel, L. T.; P. J. Crutzen und J. Fishman: A two-dimensional photochemical model of the atmosphere 1; Chlorocarbon emissions and their effect on stratospheric ozone. *J. Geophys. Res.*, 88, 1983, S. 6622-6640
- Gidel, L.T.; Shapiro, M.A.: General circulation model estimates of the net vertical flux of ozone in the lower stratosphere and the implications for the tropospheric ozone budget. *J. Geophys. Res.*, Band 85, 1980, S. 4049-4058
- Gilles, Grayham G.: Possible effects of increased exposure to ultraviolet radiation on the incidence of cutaneous malignant melanoma. in: *Health-effects of ozone layer depletion-a report of the NHMRG working party*, Melbourne 1989, National Health and Medical Research Council, in: EK-Drucksache 11/S. 87
- Gleick, P.H.: Climate change hydrology and water resources, eingereicht bei: *Review of Geophysics*, 1989
- Goreau, T.J.; de Mello, W.Z.: Tropical deforestation: Some effects on atmospheric chemistry. *Ambio* Band 17, 1988, S. 275-281
- Gornitz, V.; Lebedeff, S.: Global sea level changes during the past century, In: *Sea-level fluctuations and coastal evolution*, Nummedal, D.; O.H. Pickey, O.H. Howard, J.D. (Hrsg.). *SEPM Special Publication* Nr. 41, 1987
- Gourdiaan, J.; Ketner, P.: A simulation study for the global carbon cycle including man's impact on the biosphere. *Climate Change* Band 6, 1984, S. 167-192
- Grams, G. und G. Fiocco: *J. Geophys. Res.* 72, 1967, S. 3523
- Graßl, H.: Strahlung in getrübten Atmosphären und in Wolken. *Hamburger Geophysikalische Einzelschriften*, Reihe B, Heft 37, 1978
- Graßl, H.: The influence of aerosol particles on radiative parameters of clouds. *Idöjaras* Band 86, 1982, S. 60-74
- Graßl, H.: What are the radiative and climative consequences of the changing concentration of atmospheric aerosol particles, in: *The Changing Atmosphere*, Rowland, Isaksen (Hrsg.), Wiley, London, 1988, S. 187-199
- Graßl, H.: Wolkenbildung durch die Emissionen hochfliegender Flugzeuge. In: *Ökologische Folgen des Flugverkehrs*, Tutzing Materialien Nr. 50/1988, M. Held (Hrsg.), Evangelische Akademie Tutzing, 1988 a
- Gray, L. J. und J. A. Pyle: Two-dimensional model studies on equatorial dynamics and tracer distributions. *Q. J. R. Meteorol. Soc.*, 113, 1987, S. 635-651
- Greenberg, J.P.; Zimmerman, P.R.; Chatfield, R.B.: Hydrocarbons and carbon monoxide in African savannah air. *Geophys. Res. L.*, Band 12, 1985, S. 113-116
- Gregory, G.L. u. a.: Air chemistry over the tropical forest of Guayana. *J. Geophys. Res.*, Band 91, 1986, S. 8603-8612
- Gregory, G.L.; Browell, E.V.; Warren, L.S.: Boundary layer ozone: An airborne survey above the Amazon Basin. *J. Geophys. Res.*, Band 93, 1988, S. 1452-1468
- Gregory, S.: The changing frequency of droughts in India, 1871-1985. *J. Geogr.* Band 155, 1989, S. 322-334
- Grulke, N.E. u. a.: Carbon balance in tussock tundra under ambient and elevated atmospheric  $\text{CO}_2$ . *Oecologia*, 1986
- Gulliksen und Lonne, zitiert in: *Abschlußbericht von Working Group I, International Panel on Climatic Changes*, 1990
- Guthrie, P. D.; C. H. Jackman; J. R. Herman und C. J. McQuillan: A diabatic circulation experiment in a two-dimensional photochemical model. *J. Geophys. Res.*, 89, 1984, S. 9589-9602
- Habek, H. u. a.: Induction and photoreversal of bean leaf peroxidase isoenzymes by germicidal and near ultraviolet radiation. *Radiation Biology*, 1, 1984, S. 243-250

- Hahn, J.; Crutzen, P.J.: The role of fixed nitrogen in atmospheric photochemistry. *Phil. Trans. R. Soc. (London)*, Band B 296, 1982, S. 521-541
- Hahn, J.; Matuska, P.: Nonmethane hydrocarbon measurements at two mountain stations in the Bavarian alps. *Proc. Symp. COST 611, Working Group 3 „Field measurements and their interpretation“*, held at C.I.E.M.A.T., Madrid, Spain, March 1990, M.M. Milan (Hrsg.), im Druck
- Halpern, P.; Dave, J. V. und Braslau, N.: Sea-Level Solar Radiation in the Biologically Active Spectrum. *Science*, 186, 1974, S. 1204-1208
- Hansen, J. u. a.: Climate sensitivity analysis of feedback mechanisms In: *Climate Processes and Climate Sensitivity. Geophys. Meonog. Ser. Band 29, AGU, Washington, 1984, S. 130-163*
- Hansen, J. u. a.: Global climate chances as forecast by Goddard Institute for Space Studies (GISS's) three-dimensional model. *J. Geophys. Res. Band 93, 1988, S. 9341-9364*
- Hansen, J.; Lebedeff, S.: Global trends of measured surface air temperature. *J. Geophys. Res. Band 92, 1987, S. 13345-13372*
- Hansen, J.E.; Lebedeff, S.: Global surface air temperatures: Update through 1987. *Geophys. Res. Lett. Band 15, 1988, S. 323-326*
- Hao, W.M., Wofsy, S.C., McElroy, M.B., Beer, J.M., Togan, M.A.: Sources of atmospheric nitrous oxide from combustion. *J. Geophys. Res., Band 92, 1987, 3098-3104*
- Harries, J.E.: The distribution of water vapor in the stratosphere. *Rev. Geophys. Space Sci. Band 14, 1976 S. 565 -575*
- Harriss, R.C.; Sebacher, D.I.; Bartlett, K.B.; Bartlett, D.S.; Crill, P.M.: Sources of atmospheric methane in the South Florida environment. *Global Biogeochem. Cycles, Band 2, 1988, S. 231-244*
- Hartmann, W.R.; Andreae, M.O.; Helas, G.: Measurements of organic acids over Central Germany. *Atmos. Environ., Band 23, 1989, S. 1531-1533*
- Harvey, L. D. D.: Effect of model structure on the response of terrestrial biosphere model to CO<sub>2</sub> and temperature increases. *Global Biochem. Cycles 3 Band (2), 1989a, S. 137-153*
- Harvey, L. D. D.: Managing atmospheric CO<sub>2</sub>. *Climatic Change Band 15, 1989b, S. 343-381*
- Harvey, L. D. D.; Schneider, S.H.: Transient climate response to external forcing on 100-104 year time scales, Part 1: Experiment with globally averaged coupled atmosphere and ocean energy balance models. *J. Geophys. Res. Band 90, D 1, 1985, S. 2191-2205*
- Heck, W.W. u. a.: Assessment of crop loss from ozone. *J. of Air Pollution Control Association, 31, 1982, S. 353-361*
- Heidt, L.E. u. a.: Latitudinal distribution of CO and CH<sub>4</sub> over the Pacific. *J. Geophys. Res., Band 85, 1980, S. 7329-7338*
- Hennicke, P.: Least-Cost Planing-Methode, Erfahrungen und Übertragbarkeit auf die Bundesrepublik, in: *Zeitschrift für Energiewirtschaft Nr. 2*
- Hense, A.; Kerschgens, M.; Raschke, E.: An economical method of computing the radiative transfer in circulation models. *Quart. J. Roy. Met. Soc. Band 107, 1982, S. 231-252*
- Hense, A.; Krahe, P.; Flohn, H.: Recent fluctuations of tropospheric temperature and water vapour content. *Meteor. Atm. Physics Band 38, 1988, S. 215-227*
- Hibler, W.D.: A dynamic-thermodynamic sea ice model. *J. Phys. Ocean., Band 9, 1979, S. 815-846*
- Hoffert, M. I. u. a.: The role of deep sea heat storage in the secular response to climatic forcing. *J. Geophys. Res. Band 85, 1980, S. 6667-6679*
- Hofman, D.J. und S. Solomon: Ozone destruction through heterogeneous chemistry following the eruption of El Chichon. *J. Geophys. Res., 94, 1989, S. 5029*
- Hofman, D.J.; J.M. Rosen; J.W. Harder und S.R. Rolf: Observations of the decay of the El Chichon stratospheric aerosol cloud in Antarctica, *Geophys. Res. Lett. 11, 1987, S. 614*
- Holzappel-Pschorn, A.; Seiler, W.: Methane emission during a cultivation period from an Italian rice paddy. *J. Geophys. Res., Band 91, 1986, S. 11803-11814*
- Hooper, A.B. u. a.: Photoinactivation of ammonia oxidation in *Nitrosomonas*. *Journal of Bacteriology, 119, S. 899-906, 1974*
- Hopf, R., Schallaböck, K.O., Steierwald, G., Wacker, M.: *Konzeptionelle Fortentwicklung des Verkehrsberreichs. Zusammenfassung der Ergebnisse des Studienkomplexes A.6, Berlin / Dortmund / Stuttgart 29.05.1990*
- Hough, A.M.; Derwent, R.G.: Changes in the global concentration of tropospheric ozone due to human activities. *Nature, Band 344, 1990, S. 645-648*
- Houghton, R.A. und G.M. Woodwell: Global Climatic Change. in: *Scientific American, 260, 1989, S. 36-44*
- Houghton, R.A. u. a.: The flux of carbon from terrestrial ecosystems to the atmosphere in 1980 due to changes in land-use: geographic distribution of the global flux. *Tellus Band 39 B, 1987, S. 122-139*
- Houghton, R.A.; Skole, D.L.: Changes in the global carbon cycle between 1700 and 1985. In *„The Earth transformed by human action“*, B.L. Turner (Hrsg.), Cambridge University Press, 1990, im Druck
- Houghton, R.A.; Schlesinger, W.H.; Brown, S.; Richards, J.F.: Carbon dioxide exchange between the atmosphere and terrestrial ecosystems. In *„Atmospheric Carbon Dioxide and the Global Carbon Cycle“*, J.R. Trabalka (Hrsg.), U.S. Department of Energy, DOE/ER-0239, Washington, D.C. (USA), 1985b
- Houth, A.M.; Derwent, R.G.: Computer modelling studies of the distribution of photochemical ozone production between different hydrocarbons. *Atmos. Environ., Band 21, 1987, S. 2015-2033*

- Huerta, A.J. u. a.: Control of intracellular glutathione and its effect on ultraviolet radiation-induced K<sup>+</sup> efflux in cultured rose cells. *Plant Cell and Environment*, 12, S. 825-830, 1989
- Hull, C.H.J. und Titus, J.G.: Greenhouse Effect, Sea Level Rise and Salinity in the Delaware Estuary. EPA, Washington, D.C., 1986
- Husar, R.B.; Patterson, D.E.; Holloway, J.M.; Wilson, W.E.; Ellestad, T.G.: Trends of eastern U.S. haziness since 1948. Fourth symposium on turbulence, diffusion and air pollution, January 15-18, Reno, Nevada, American Meteor. Soc., 1979, S. 249-256
- Ilyas, M.: Effect of Cloudiness on solar ultraviolet radiation leading surface. *Atmos. Environ* 21, 1483-1484 (1987)
- Industrial Economics: Halon Usage and Emissions 1987
- International Conference on „Global Warming And Climate Change: Perspectives From Developing Countries“: Conference Statement, Neu Dehli, den 21.-23. Februar 1989
- International Conference on Energy and Climate and Development: Policy Issues and Technological Options: Highlights of Deliberations, Saarbrücken, den 28.-31. Mai 1990
- Internationaler Weizenrat: 10th of July 1989, Market Report, London, 1989
- IPCC (Working group II) WG 2: Bericht der Arbeitsgruppe „Impacts“ an das Intergovernmental Panel on Climate Change, WMO/UNEP, Genf, 1990
- IPCC: Policymakers summary of the Formulation of the Response Strategies (Report prepared for IPCC by Working Group III, June 1990
- Isaacson, D.: Cancer in the skin in urban blacks in South Africa. *British Journal of Dermatology* 100, 1979, S. 347-350
- Isaksen, I. S. A. und F. Stordal: Ozone perturbations by enhanced levels of CFCs, N<sub>2</sub>O and CH<sub>4</sub>: A two-dimensional diabatic circulation study including uncertainty estimates. *J. Geophys. Res.*, 91, 1986, S. 5249-5263
- Isaksen, I. S. A.; B. Rognerud und F. Stordal: Studies of arctic stratospheric ozone in a 2-D model including some effects of zonal asymmetries, *Geophys. Res. Lett.*, 1990, S. 557-560
- Isaksen, I. S. A.; K. Midleboe; J. Sunde und P. J. Crutzen: A simplified methode to include molecular scattering and reflection in calculations of photon fluxes and photodissociation rates. *Geophys. Norv.*, 31, 1977, S. 11-26
- Isaksen, I.S.A. u. a.: Active stratospheric ozone: 2-D model studies. Eingereicht bei *Geophys. Res. Letters*, 1990
- Isaksen, I.S.A.: Is the oxidizing capacity of the atmosphere changing? In „The Changing Atmosphere“, F.S. Rowland und I.S.A. Isaksen (Hrsg.), Dahlem Konferenzen, s. Bernhanrd, John Wiley and Sons, Chichester, England, 1988, S. 141-157
- Isaksen, I.S.A.; Hov, O.; Calculation of trends in the tropospheric concentration of O<sub>3</sub>, OH, CH<sub>4</sub>, and NO<sub>x</sub>. *Tellus Band 39 B*, 1987, S. 271-285
- Isidorov, V.A.; Zenkevich, I.G.; Ioffe, B.V.: Volatile organic compounds in the atmosphere of forests. *Atmos. Environ.*, Band 19, 1985, S. 1-8
- Jackman, C. H.; R. K. Seals, Jr. und M. J. Prather: Two-dimensional intercomparison of stratospheric models. NASA Conference Publication 3042, Washington, D.C., 1989
- Jacob, D.J.; Wofsy, S.C.: Budgets of reactive nitrogen, hydrocarbons and ozone over the Amazon forest during the wet season. *J. Geophys. Res.*, Manuskript eingereicht
- Jacobsen, J.I.: Abandoning Homelands. in: State of the World. Worldwach Institute, Washington, D.C., 1989
- Jaffe, L.S.: Ambient carbon monoxide and its fate in the atmosphere. *J. Air Pollut. Contr. Assoc.*, Band 18, 1968, S. 534-540
- Jaffe, L.S.: Carbon monoxide in the biosphere: Sources, distribution, and concentrations. *J. Geophys. Res.*, Band 78, 1973, S. 5293-5305
- Jarvis, P.G.: Atmospheric carbon dioxide and Forests. *Phil. R. Soc. B.*, 324, 1989, S. 369-392
- Jochem, E., Schmitt, D., Düngen, H., Ott, V.: Wirkungsanalysen energiepolitischer Instrumente und Maßnahmenbündel zur Vermeidung und Verminderung des Energieverbrauchs und der Emission energiebedingter klimarelevanter Spurengase. Zusammenfassung der Ergebnisse des Studienkomplexes F. Karlsruhe / Essen 30.3.1990
- Johnston, H. S.; D. E. Kinnison und D. J. Wuebbles: Nitrogen oxides from high-altitude aircraft: an update of potential effects on ozone. *J. Geophys. Res.*, 94, 1989, S. 16351-16363
- Johnston, H.S.: Reduction of stratospheric ozone by nitrogen oxide catalysts from supersonic transport exhaust. *Science*, 173, 1971, S. 517-522
- Jones, P. D.: The influence of ENSO on global temperature. *Climate Monitor Band 17* (3), 1988, S. 80-89.
- Jones, P. D.; Wigley, T.M.L; Wright, P.B. Global temperature variations between 1861 and 1984. *Nature Band 332*, 1986, S. 430-434
- Jones, P.D. u. a.: Northern hemisphere surface air temperature variations 1851-1984. *Journal of Climate and Applied Meteorology Band 25*, 1986 a, S. 161-179
- Jones, P.D.: Global temperature variations since 1861: The influence of the southern oscillation and a look at recent trends. In: Proceeding of 28th Liège International Astrophysical Colloquium, June 26-30, 1989, J.C. Crutzen, P. J. Gérard Zander, R. (Hrsg.), Université de Liège, 1989, S. 287-302
- Jones, P.D.: Hemispheric surface air temperature variations: recent trends and an update to 1987. *Journal of Climate Band 1*, 1988, S. 654-660

- Jones, P.D.; Raper, S.C.B.; Wigley, T.M.L.: Southern hemisphere surface temperature variations 1851-1984. *Journal of Climate and Applied Meteorology* Band 25, 1986 b
- Junge, C.E.: The cycle of atmospheric trace gases-natural and man made. *Quart. J. Roy. Meteorol. Soc.* Band 98, 1972, S. 711-716
- Kaase, H.; Bischoff, K. und Metzdorf, J.: Strahlernormale. in: Vieth, G.; Kaase, H. (Hrsg.): *Spektralradiometrie: Methodik, Meßtechnik, Anwendung*. PT-Bericht Opt-24, 1986
- Kalkstein, L.S.: Potential Impact of Global Warming: Changes in Mortality from Extreme Heat and Cold. in: *Coping with Climate Change*. Topping, Jr. (Hrsg.), Climate Institute, Washington, D.C., 1989
- Karlsson, H., *Radioactive Waste Disposal, The Swedish Concept*, Phys. Technology, 16/1985
- Karol, I. L. und E. V. Rozanov: Radiative-convective models of climate. *Izv., Atmosph. Ocean. Physics*, 18, 1982, S. 910-918
- Karol, I. L.: System modeling of the „greenhouse effect“ transport and photochemistry of trace gases in the atmosphere. *Izv., Atmosph. Ocean. Physics*, 16, 1980, S. 12-18
- Kavanaugh, M.: Estimates of future CO, N<sub>2</sub>O and NO<sub>x</sub> emissions from energy combustion. *Atmos. Environment*, 21, 1987, S. 463-468
- Keeling, C.D., u. a.: A three dimensional model of atmospheric CO<sub>2</sub> transport based on observed winds: 1. Analysis of observational data. In „Aspects of climate variability in the Pacific and the Western Americas“, D.H. Peterson (Hrsg.), *Geophys. Monograph*, Band 55, AGU, Washington (USA), 1989, S.165-236
- Keeling, C.D.: The carbon dioxide cycle: Reservoir models to depict the exchange of atmospheric carbon dioxide with the oceans and land plants. In: *Chemistry of the Lower Atmosphere*, Rasool, S.I. (Ed.), Plenum Press, New York, 1973, S. 251-329
- Keeling, C.D.; Heimann, M.: Meridional eddy diffusion model of the transport of atmospheric carbon dioxide. 2. Mean annual carbon cycle. *J. Geophys. Res.*, Band 91, 1986, S. 7782-7798
- Keeling, C.D.; Piper, S.C.; Heimann, M.: A three dimensional model of atmospheric CO<sub>2</sub> transport based on observed winds: 4. Mean annual gradients and interannual variations. In „Aspects of climate variability in the Pacific and the Western Americas“, D.H. Peterson (Hrsg.), *Geophysical Monograph*, Band 55, AU, Washington, D.C., 1989 b, S. 305-363
- Keller, M.; Kaplan, W.A.; Wofsy, S.C.: Emissions of N<sub>2</sub>O, CH<sub>4</sub>, and CO<sub>2</sub> from tropical soils. *J. Geophys. Res.*, Band 91, 1986, S. 11791-11802
- Khalil, M.A.K.; Rasmussen, R.A.: Atmospheric methane: Recent global trends. *Environ. Sci. Technol.* Band 24, 1990, S. 549-553
- Khalil, M.A.K.; Rasmussen, R.A.: Carbon monoxide in the Earth's atmosphere: Increasing trend. *Science*, Band 224, 1984, S. 54-56
- Khalil, M.A.K.; Rasmussen, R.A.: Carbon monoxide in the Earth's atmosphere: Indications of a global increase. *Nature*, Band 332, 1988 a, S. 242-245
- Khalil, M.A.K.; Rasmussen, R.A.: Causes of increasing methane: Depletion of hydroxyl radicals and the rise of emission. *Atmos. Environ.* Band 19, 1985, S. 397-400
- Khalil, M.A.K.; Rasmussen, R.A.: Interannual variability of atmospheric methane: Possible effects of the El-Niño/Southern Oscillation. *Science*, Band 232, 1986, S. 56-58
- Khalil, M.A.K.; Rasmussen, R.A.: Nitrous oxide: Trends and global mass balance over the last 3000 years. *Ann. Glaciology* Band 10, 1988 b, S. 73-79
- Khalil, M.A.K.; Rasmussen, R.A.; Shearer, M.J.: Trends of atmospheric methane during the 1960s and 1970s. *J. Geophys. Res.* Band 94, 1989, S. 18 279-18 288
- Kilian, Michael: *Umweltschutz durch internationale Organisationen-die Antwort des Völkerrechts auf die Krise der Umwelt?*, Berlin 1987
- Kimball, B.A.: Carbon dioxide and agricultural yield: An assemblage and analyses of 770 prior observations, *Water Conservation Laboratory*. Report No. 14, USDA Agricultural Research Service, Phoenix, Arizona, 1983
- Kirchhoff, V.W.J.H.: Ozone measurements in Amazonia: Dry versus wet season. *J. Geophys. Res.*, 1990, Manuskript eingereicht
- Kirchhoff, V.W.J.H.; Marimho, E.V.A.: A survey of continental concentrations of atmospheric CO in the Southern Hemisphere. *Atmos. Environ.*, Band 23, 1989, S. 461-466
- Kirchhoff, V.W.J.H.; Setzer, A.W.; Pereira, M.C.: Biomass burning in Amazonia: Seasonal effects on atmospheric O<sub>3</sub> and CO. *Geophys. Res. L.*, Band 16, 1989, S. 469-472
- Kleemann, Meliß: *Regenerative Energiequellen*, 1988
- Ko, M. K. W.; K. K. Tung; D. K. Weisenstein und N. D. Sze: A zonal mean model of stratospheric tracer transport in isentropic coordinates: numerical simulations for nitrous oxide and nitric acid. *J. Geophys. Res.*, 90, 1985, S. 2313-2329
- Köhler, U. u. a.: Vergleich und Bewertung von 2 Spektrophotometern zur Messung des Gesamt ozons. *Meteorologische Rundschau* 42, 1989, S. 1-9
- Kohler, S., u. a.: *Bestandsaufnahme und Perspektiven der Atom- und Energiewirtschaft der DDR*, Berlin, Darmstadt, Freiburg, 1990
- Komhyr, W.D.; R.D. Grass und R.K. Leonard: Total ozone decrease at South Pole Antarctica, 1964-1985. *Geophys. Res. Lett.*, 13, 1986, S. 1248
- Krause, F; Bach, W.; Koomey, J.: *Energy Policy in the Greenhouse*, Band Nr. 1, Int. Project for Sustainable Energy Paths, El Cerrito, Kalifornien, USA, 1989

- Krueger, A.J.; M.R. Schoeberl und R.S. Stolarski: TOMS observations of total ozone in the 1986 Antarctic spring. *Geophys. Res. Lett.*, 14, 1987, S. 527
- Kullmann, L.: Past and present tree lines of different species in the Hondolan Valley, Central Sweden. in: *Tree Line Ecology*; Morisset und Payette (Hrsgs.), Centre d'Etudes Nordiques de l'Université Laval, Quebec, Canada, 1983
- Kutzbach, I.E.; Guetter, P.J.: The influence of changing orbital parameters and surface boundary conditions on climate simulations for the past 18 000 years. *J. Atmos. Sci.* Band 43, 1986, S. 1726-1759
- Kvenvolden, K.A.: Methane hydrates and global climate. *Global Biogeochem. Cycles*, Band 2, 1988, S. 221-230
- Labitzke, K. und H. v. Loon: Associations between the 11-year solar cycle, the QBO and the atmosphere, Part I: the troposphere and stratosphere in the Northern Hemisphere in the winter. *J. Atmos. Terr. Phys.* 50, 1988, S. 197
- Labitzke, K. und H. v. Loon: *Geowissenschaften* 8, 1990, S. 1
- Labitzke, K. und H. von Loon: Association between the 11-year solar cycle, the QBO and the atmosphere, Part II: surface and 700 mb in the Northern Hemisphere in winter. *J. Climate*, 1, 1988, S. 905
- Lait, L.R.; M.R. Schoeberl und P.A. Newman: Quasi-biennial modulation of the Antarctic ozone depletion. *Geophys. Res. Lett.*, 1989
- Lal, S.; R. Borchers; P. Fabian und B.C. Kruger: Increasing abundance of CF<sub>2</sub>BrCl in the atmosphere. *Nature*, 316, 1985, S. 135-136
- Lamb: *Klima und Kulturgeschichte. Der Einfluß des Wetters auf den Gang der Geschichte (Deutsche Übersetzung)*. Rowohlt Verlag, Reinbek, 1989
- Lamothe, und Periard: Ontario, Implications of Climate Change for Canada down hill skiing in Quebec. Environment Canada, CCD 88-03, Downsview, Ontario, Canada, 1988
- Länderarbeitsgemeinschaft Wasser (LAWA): Grundlagen für die Beurteilung der Wärmebelastungen von Gewässern. 2. Aufl., 123 Seiten, Mainz (Krach), 1977
- Larsen, S.H.H. und T. Henriksen: *Nature*, 343, 1990, S. 124
- Last, J.A.; Warren, D.L.; Pecquet-Goad, E. und Witsohl, H.P.: Modification of lung tumor development in mice by ozone. *J. National Cancer Institute*, 78, 1987, S. 149-154
- Le Houeron, H.N.: Global change: population, land use and vegetation in the Mediterranean basin by the mid 21st century. European Conference on landscape Ecological Impact of Climate Change, 3–7 December 1989, Lunteren, Niederlande, 1989
- Le Houeron, H.N.: Pastoralism; in *Climate Impact Assessment*; Kater, Ausubel und Berberian (Hrsgs.); Wiley, Chichester, 1985
- Lean, J. und Warrilow, D. A.: Simulation of the regional impact of Amazon deforestation. *Nature*, 342, 1989, S. 411-413
- Legrand, M. R.; F. Stordal und I. S. A. Isaksen: A model study of the stratospheric budget of odd nitrogen, including effects of solar cycle variations. *Tellus* 41 B, 1989, S. 413-426
- Lelieveld, J. und P. J. Crutzen: Influences of cloud photochemical processes on tropospheric ozone. *Nature*, 343, 1990, S. 227-233
- Lenschow, D.H.; Pearson, R., Jr.; Stankov, B.B.: Measurements of ozone vertical flux to ocean and forest. *J. Geophys. Res.*, Band 87, 1982, S. 8833-8837
- Lerner, J.; Mathews, G.; Fung, I.: Methane emissions from animals. A global high-resolution data base. *Global Biogeochem. Cycles*, Band 2, 1988, S. 139-156
- Levitus, S.: *Climatological Atlas of the World Ocean*. NOAA Professional Paper, Band 13, Rockville, Madison, USA, 1982
- Levy, H., Mahlman, J.D., Moxim, W.J., Liu, S.C.: Tropospheric ozone: The role of transport. *J. Geophys. Res.*, Band 90, 1985, S. 3753-3772
- Lewis, J.: The implications of Sea level Rise for Island and Low-Lying Countries. Report for Commonwealth Secretariat, 1988
- Liehne, P.F.S.: Climatic influences on mosquito-borne diseases in Australia. in: *Greenhouse: Planning for Climate Change*; Pearnian (Hrsg.), CSIRO, Melbourne, 1985
- Lin, X.; Trainer, M.; Liu, S.C.: On the nonlinearity of the tropospheric ozone production. *J. Geophys. Res.*, Band 93, 1988, S. 15879-15888
- Liu, S.C.; McFarland, M.; Kley, D.; Zafiriou, O.; Huebert, B.J.: Tropospheric NO<sub>x</sub> and O<sub>3</sub> budgets in the equatorial Pacific. *J. Geophys. Res.*, Band 88, 1983, S. 1360-1368
- Logan J.A.; Kirchhoff, V.W.J.H.: Seasonal variations of tropospheric ozone at Natal, Brazil. *J. Geophys. Res.*, Band 91, 1986, S. 7875-7881
- Logan, J.A.: Nitrogen oxides in the troposphere: Global and regional budgets. *J. Geophys. Res.*, Band 88, 1983, s. 10785-10807
- Logan, J.A.: Tropospheric ozone: Seasonal behavior, trends, and anthropogenic influence. *J. Geophys. Res.*, Band 90, 1985, S. 10463-10482
- Logan, J.A.; Prather, M.J.; Wofsy, S.C.; McElroy, M.B.: Tropospheric chemistry: A global perspective. *J. Geophys. Res.*, Band 86, 1981, S. 7210-7254
- Lopez, A.; Barthomeuf, M.O.; Huertas, M.L.: Simulation of the chemical processes occurring in an atmospheric boundary layer. Influence of light and biogenic hydrocarbons on the formation of oxidants. *Atmos. Environ.*, Band 23, 1989, S. 1465-1478
- Louis, J.-F.: A parametric model of vertical eddy fluxes in the atmosphere. *Boundary-Layer Meteorol.* Band 17, 1979, S. 187-202

- Lowe, D.C.; Schmidt, U.: Formaldehyde (HCHO) measurements in the nonurban atmosphere. *J. Geophys. Res.* 88, 1983, S. 10884-10858
- Lowe, D.C.; Schmidt, U.; Ehhalt, D.H.: The tropospheric distribution of formaldehyde. Report 1756, KFA Jülich, 1981
- Lubin, D.; Frederick, G.E.; Booth, C. R.; Lucas, T. und Neuschuber, D.: *Geophysical Research Letters*, 16, 1985, S. 783
- Luizao, F.; Matson, P.; Livingston, G.; Luizao, R., Vitousek, P.: Nitrous oxide flux following tropical land clearing. *Global Biogeochem. Cycles*, im Druck
- Madronich, S. und Weller: Numerical integration errors in calculated tropospheric photolysis rates. *J. Atmos. Chem.*, 10, 1990, S. 289-300
- Madronich, S., J. Frederik, G. Brasseur und M. M. Caldwell: Predicted changes in surface UV-radiation. in: Draft UNEP Atmospheric Sciences Panel Report, 1989. zit. in: United Nations Environment Programm. Environmental Effects Panel Report, November 1989, S. 7
- Maier-Reimer, E.; Hasselmann, K.: Transport and storage of CO<sub>2</sub> in the ocean-An inorganic ocean-circulation carbon cycle model. *Climate Dynamics*, Band 2, 1987, S. 63-90
- Maitcouk, I. F.: Trachoma and Cataract: Two WHO targets. in: *Int. Nurse. Rev.*, 32, S. 23-25, 1985
- Manabe, S.; Bryan, K. und Spelman, M.: Transient response of a global ocean-atmosphere model to a doubling of atmospheric carbon dioxide. *J. Geophys. Res.*, 1989
- Manabe, S.; Wetherald, R.T.: Thermal equilibrium of the atmosphere with a given distribution of relative humidity. *J. Atmos. Sci.* Band 24, 1967, S. 241-259
- Mansfield, T. und Nishioka, S.: An Assessment of the Research on the Effects of a Rise in Sea Level by the Relevant Japanese Ministries. Bericht an IPCC, WG II. 1986
- Mantis, H.T.; C.F. Zerefos; A. Bais; I. Ziomas und A. Kelessis: *Arch. Met. Geoph. Biocl. Serie, B.* 36, 1986, S. 135
- Mao Yushi: What are the implications and challenges for LDC's?-A Chinese Perspective. Vortrag vor der „Fourth International Energy Conference“ des Royal Institute of International Affairs am 4. Dezember 1989, handschriftliches Manuskript, London 1989
- Märkl: Sicherheitstechnische Ziele und Entwicklungstendenzen für die nächste Generation von LWR-Kernkraftwerken, VDI-Berichte, Düsseldorf 1990
- Marland, G., u. a.: Estimates of CO<sub>2</sub> emissions from fossil fuel burning and cement manufacturing based on UN energy statistics and the U.S. Bureau of Mines cement manufacturing data. ORNL/CDIAC-25 NPD-030, Oak Ridge Nat. Lab., Oak Ridge, USA, 1989
- Marland, G.: Fossil fuel CO<sub>2</sub> emissions: Three countries account for 50% in 1986. CDIAC Communications, Oak Ridge National Laboratory, Oak Ridge, Tennessee, 1-4, winter 1989, 1989
- Marx, Robin: Possible effects of increased ultraviolet radiation on the incidence of non-melanocytic skin cancer. In: Health effects of ozone layer depletion-a report of the NHMRC working party, Melbourne 1989, National Health and Medical Research Council, in: EK-Drucksache 11/116, S. 71
- Mathews, G.; Fung, I.: Methane emissions from natural wetlands: Global distribution, area and environment of characteristic sources. *Global Biogeochem. Cycles*, Band 1, 1987, S. 61-86
- Matson, P.A.; Vitousek, P.M.: Cross-system comparisons of soil nitrogen transformations and nitrous oxide flux in tropical forest ecosystems. *Global Biogeochem. Cycles*, Band 1, 1987, S. 163-170
- May, S. Dolam, R. und Haydens B.: Erosion of US-Shorelines. *EOS*, 64, 1983, S. 551-552
- McConnell, J.C.; McElroy, M.B.; Wofsy, S.C.: Natural Sources of atmospheric CO. *Nature*, Band 233, 1971, S. 605-608
- McElroy, M.B.; Wofsy, S.C.: Tropical forests: Interactions with the atmosphere. In „Tropical Rain forests and the World Atmosphere“, AAAS Selected Symposium 101, G.T. Prance (Hrsg.), Westview Press, Inc., Boulder, Colorado (USA), 1986, S. 33-60
- Meier, M.F.: Contribution of small glaciers to global sea level. *Science* Band 226, 1984, S. 1418-1421
- Meier, M.F.: Reduced rise in sea level. *Nature* Band 343, 1990, S. 115-116
- Metz, N.: Personenwagen-Abgasemissionen im Spurenbereich. *Automobiltechnische Zeitschrift* Band 84, 1984, S. 1-6
- Meyer-Abich, K. und Schefold, B., *Die Grenzen der Atomwirtschaft*, München 1986
- Meyer-Abich, K., u. a., *Energiesparen: Die neue Energiequelle*, München 1979 (1. Auflage)
- Michaelis, H. und W. Pelz: *Grenzen der Kernenergie-Eine kritische Auseinandersetzung mit Meyer-Abich und Schefold*, Düsseldorf 1987
- Michaelis, H.: *Handbuch der Kernenergie*, 2 Bde., München 1982
- Midgley, P.M.: The Production and release to the atmosphere of 1,1,1 Trichloroethane (Methyl Chloroform). *Atmospheric Environment*, 23, 12, 1989, S. 2663-2665
- Mikolajewicz, U.: *Berichte des Max-Planck-Instituts*, Nr. 49, Hamburg, 1990
- Milankovitch, M.: Kanon der Erdbestrahlung. *R. Serbian Acad. Spec. Publ.* 132, Sect. Math. Nat. Sci. Band 33, 1941
- Miller, C.; D. L. Filkin; A. J. Owens; J. M. Steed und J. P. Jesson: A two-dimensional model of stratospheric chemistry and transport. *J. Geophys. Res.*, 86, 1981, S. 12039-12065
- Mintzer, I. M.: A matter of degree. The potential for controlling the greenhouse effect. Bericht Nr. 5, World Resources Institute, Washington, D.C., 1987

- Mitchell, J.F.B. und Warrilow: Summer dryness in Northern midlatitudes due to increased CO<sub>2</sub>. *Nature*, 330, 1987, S. 238-240
- Mitchell, J.F.B.: The greenhouse effect and climate change. *Rev. Geophysics*, 27, 1989, S. 115-139
- Mitchell, J.F.B.; Senior, C.A.; Ingram, W.J.: CO<sub>2</sub> and climate: A missing feedback? *Nature* Band 341, 1989, S. 132-134
- Molina, M.J. und F.S. Rowland: Stratospheric sink for chlorofluoromethanes, chlorine atom catalyzed destruction of ozone. *Nature*, Band 249, 1974, S. 810-814
- Moltke, Konrad von: The Economic Summit-An Environmental Agenda For Action (Draft), May 1989, S. 3
- Monyama, M. und Katayama, K.: Deseasonalization of mortality in the world. *Int. J. Biometeorology*, 16, 1972, S. 329-342
- Moore, B.; Björkström, A.: Calibrating ocean models by the constrained inverse method. In: *The Changing Carbon Cycle: A Global Analysis*. Trabalka, J.R.; Reichle, D.E. (Eds.), Springer Verlag, New York, 1986, S. 295-328
- Morison, J.I.L.: Plant growth in increased atmospheric CO<sub>2</sub>. in: „Carbon Dioxide and other Greenhouse Gases: Climatic and Associated Impacts“. Fantechi und Ghazi (Hrsgs.), Kluwer, Dordrecht, 1989
- Münchener Rückversicherung: Das Risiko einer Klimaänderung aus der Sicht der MR. Vortrag von Klaus Konrad, Mitglied des Vorstands der MR am 11.07.1990, 1989
- Murphy, T.M. u. a.: Stress-induced efflux of K<sup>+</sup>ion: Environmental control. in: *Growth and Differentiation in Plants*. 1988, Chardigarh, India
- Murphy, T.M. u. a.: UV-induced synthesis of hydrogen peroxide. *Plant Physiology*, 89, 1989, S. 764
- Muzio, L.J.; Kramlich, J.C.: An artifact in the measurement of N<sub>2</sub>O from combustion sources. *Geophys. Res. L.*, Band 15, 1988, S. 1369-1372
- Myers, N.: Deforestation Rates in Tropical Forests and their Climatic Implications. A Friends of the Earth Report, London, 1989
- Kilian, Michael: Umweltschutz durch internationale Organisationen, Berlin 1987, S. 343
- Naujokat, B.: An update of observed quasi-biennial oscillation of the stratospheric winds over the tropics. *J. Atmos. Sci.* 43, 1986, S. 1873
- Neftel, A. u. a.: Sulfate and nitrate concentrations in snow from South Greenland 1895-1978. *Nature* Band 314, 1985 b, Seite 611-613
- Neftel, A.; Moor, E.; Oeschger, H.; Stauffer, B.: Evidence from polar ice cores for the increase in atmospheric CO<sub>2</sub> in the past two centuries. *Nature*, Band 315, 1985 a, S. 45-47
- Neitzert, V.; Seiler, W.: Measurement of formaldehyde in clean air. *Geophys. Res. L.*, Band 8, 1981, S. 79-82
- Neue, H.H.; Scharpenseel, H.W.: Gaseous products of decomposition of organic matter in submerged soils. In „Organic matter and Rice“, *Int. Rice Res. Inst.*, Los Banos, Philippinen, 1984, S. 311-328
- Newell, R.E.; Reichle, H.G., Jr.; Seiler, W.: Carbon monoxide and the burning Earth. *Scientif. American*, Oktober 1989, S. 82-88
- Nobre, C. Shukla, J. und Sellers P.: Climatic impact of Amazon Deforestation. *Science*, in press, 1990
- North, G.R.; Cahalan, R.F.; Coakley, J.A.: Energy-balance climate models. *Rev. Geophys. Space Phys.* Band 19, 1981, S. 91-122
- Noxon, J.F.: Tropospheric NO<sub>2</sub>. *J. Geophys. Res.*, Band 83, 1978, S. 3051-3057
- NRC: Causes and effects of stratospheric ozone reduction: an update. National Research Council/National Academy Press. Washington, D.C., 1982
- Nultsch, W. und D.P. Häder: Photomovement in motile microorganisms II. Photochemistry and Photobiology 47, 1988, S. 837-869
- Oberbauer, S.F.; Sionit, N; Hastings, S.J. und Oechel, W.C.: Effects of CO<sub>2</sub> enrichment and nutrition on growth, photosynthesis and nutrient concentration of Alaskan tundra plant species. *Canadian J. of Botany*, 64, 1986, S. 2993-2998
- Oberhuber, J.: An isopycnic global ocean model. Max-Planck-Institut für Meteorologie, Hamburg, 1990, im Druck
- Oechel, W.C. und Riechers, G.H.: Impacts of increasing CO<sub>2</sub> on natural vegetation, particularly tundra; in: *Climate-Vegetation Interactions*; Rosenzweig und Drekinson (Hrsgs.); UCAR Report, OIES-2, Boulder, 1986
- Oechel, W.C. und Strain, B.R.: Native species responses. in: *Direct-Effects of Carbon Dioxide on Vegetation*. Strain und Cure, US-DOE, Carbon Dioxide Research Division (Hrsg.), Washington, D.C., 1985
- ÖKO-Institut: Energiedienstleistungsunternehmen und Least-Cost Planing, Darmstadt, Freiburg, 1989
- Oeschger, H.; Heimann, M.: Uncertainties of predictions of future atmospheric CO<sub>2</sub> concentrations. *J. Geophys. Res.* Band 88, 1983, S. 1258-1262
- Oeschger, H.; Siegenthaler, U.; Schotterer, U.; Gugelmann, A.: A box diffusion model to study the carbon dioxide exchange in nature. *Tellus* Band 27, 1975, S. 168-192
- Ojo, O.: Rainfall trends in West Africa 1901-1985. *JAHS Publ. No.*, 168, 1987, S. 37-43
- Owens, A. J.; C. H. Hales; D. L. Filkin; C. Miller, J. M. Steed und J. P. Jesson: A coupled one-dimensional radiative-convective, chemistry-transport model of the atmosphere, 1. Model structure and steady-state perturbation calculations. *J. Geophys. Res.*, 90, 1985, S. 2283-2312
- Parry, M.L. und Carter, T.R.: The Assessments of the Effects of Climatic Variations Agriculture Aims, Methods and Summary of Results. in: *Climatic Variations*



- on Agriculture, Volume 1; Parry, Carter, Konijn (Hrsgs.); Kluwer, Dordrecht, 1988
- Parry, M.L.; Carter, T.R. und Porter, J.H.: The Greenhouse Effect and the Future of UK Agriculture. J. Roy. Agric. Soc. of England, 1989, S. 120-131
- Parton, W.J.; Schimel, D.S., Cole, C.V. und Ojima D.S.: Analysis of factors controlling soil organic matter levels in Great Plains grasslands. Soil Science Society of America Journal, 51, 1987, S. 1173-1179
- Pearcy, R.W. und Bjorkman, O.: Physiological Effects, CO<sub>2</sub> and Plants: The Response of Plants to Rising levels of Atmospheric CO<sub>2</sub>; Lemon (Hrsg.), Westview Press, Boulder, Colorado, 1983
- Pearman, G.I., und Hyson, P.: Global transport and inter-reservoir exchange of carbon dioxide with particular reference to stable isotope distribution. J. Atmos. Chem., Band 4, 1986, S.81-124
- Pearman, G.I.; Etheridge, D.; de Silva, F.; Fraser, P.J.: Evidence of changing concentrations of atmospheric CO<sub>2</sub>, N<sub>2</sub>O and CH<sub>4</sub> from air bubbles in Antarctic ice. Nature Band 320, 1986, S. 248-250
- Peck, T.: The world perspective. in: Forest Policy: A contribution to resource development. Hummel, Martinus (Hrsgs.), Nijhoff Publishers, Den Haag, 1984
- Pedgley, D.E.: Weather and the current desert locust plague. Weather, 44, 1989, S. 168-171
- Peele, B.D.: Insurance and the greenhouse effect. in Greenhouse: Planning for Climate Change. Pearman (Hrsg.), CSIRO Publications, East Melbourne, Australia, 1988
- Peltier, B.R.; Tushingham, A.M.: Global sea level rise and the greenhouse effect: Might they be connected? Science Band 244, 1989, S. 806-810
- Peng und Gutowski, W.J.; Wang, W.-C., Stone, P.H.: Effect of dynamic heat fluxes on model climate sensitivity: meridional sensible and latent heat fluxes. J. Geophys. Res. Band 90, 1985, S. 13 081-13 086
- Peng, T.-H.; Broecker, W.S.; Freyer, D.D.; Trumbore, S.: A deconvolution of the tree rings base 13C record. J. Geophys. Res. Band 88, 1983, S. 3609-3620
- Penkett, S.A.: Non-methane organics in the remote troposphere. In „Atmospheric Chemistry“, E.D. Goldberg (Hrsg.), Dahlem Konferenzen, S. Bernhard, Springer-Verlag, New York, 1982, S. 329-355
- Pittock, A.B.: Climate change and pattern of variation in Australian rainfall, Search Band 6, 1975, S. 498-504
- Pittock, A.B.: Recent climatic change in Australia: Implications for a CO<sub>2</sub>-warmed earth. Climatic Change Band 5, 1983, S. 321-340
- Pitts, D. G.: The effects of exposure of the eye to ultraviolet radiation. in: Environmental Vision, 1989
- Prather, M. und R.T. Watson: Stratospheric ozone depletion and future levels of atmospheric chlorine and bromine. Nature 344, 1990, S. 729-734
- Prather, M.; M. M. Garcia; R. Suozzo und D. Rind: Global impact of the Antarctic ozone hole: dynamical dilution with a three-dimensional chemical transport model. J. Geophys. Res., 95, 1990, S. 3449-3472
- Presse- und Informationsamt der Bundesregierung (Hrsg.): Internationale Umweltschutzkonferenz in Den Haag, in: Bulletin Nr. 27, Bonn, den 15. März 1989
- Presse- und Informationsamt der Bundesregierung (Hrsg.): Europäischer Rat in Dublin-Tagung der Staats- und Regierungschefs der EG am 25. und 26. Juni 1990 (Bulletin Nr. 84), Bonn, den 30. Juni 1990
- Princeton Protocol on Factors that Contribute to Global Warming. Policy Conference on the Global Environment, Princeton University, Princeton, 1988
- Prinn, R. G. und A. Golombek: Global atmospheric chemistry of CFC-123. Nature, 344, 1990, S. 47-49
- Prinn, R. u. a.: Atmospheric trends and emissions of nitrous oxide deduced from ten years of ALE-GAGE data. J. Geophys. Res., 1990, im Druck.
- Prinn, R. u. a.: Atmospheric trends in methylchloroform and the global average for the hydroxyl radical. Science, Band 238, 1987, S. 945-950
- Prinn, R. u. a.: The atmospheric lifetime experiment, 1. Introduction, instrumentation and overview. J. Geophys. Res. Band 88, 1983, S. 5547-5566
- Prior, D.E. und B.J. Oza: Geophys. Res. Lett., 5, 1978, S. 547
- Protection of the Atmosphere: International Meeting of Legal and Policy Experts: Statement of the Meeting of Legal and Policy Experts, Ottawa, den 22. Februar 1989
- Puxbaum, H. u. a.: Atmospheric concentrations of formic and acetic acid in eastern and northern Austria. Atmos. Environ., Band 22, 1988, S. 2841-2850
- Ramanathan, V. u. a.: Cloud-radiative forcing and climate: results from the Earth radiation budget experiment. Science, 243, 1989, S. 57-63
- Ramanathan, V.: Climate-Chemical Interactions and Effects of Changing Atmospheric Trace Gases. Reviews of Geophysics, 25, 7, 1987, S. 1441-1482
- Ramanathan, V.: Radiative transfer within the earth's troposphere and stratosphere: a simplified radiative convective model. J. Atmos. Sci. Band 33, 1976, S. 1330-1346
- Ramanathan, V.; R. Cicerone; H. Singh und J. Kiehl: Trace gas trends and their potential role in climatic change. J. Geophys. Res., 90, 1985, S. 5547-5566
- Rasmussen, R.A.; Khalil, M.A.K.: Atmospheric methane in the recent and ancient atmospheres concentrations, trends and interhemispheric gradient. J. Geophys. Res. Band 89, 1984, S. 11 599-11 605
- Rasmussen, R.A.; Khalil, M.A.K.: Atmospheric trace gases: Trends and distributions over the last decade. Science, Band 232, 1986, S. 1623-1624
- Rasmussen, R.A.; Khalil, M.A.K.: Isoprene over the Amazon basin. J. Geophys. Res., Band 93, 1988, S. 1417-1421

- Raval, A. und Ramanathan, V.: Observational determination of the greenhouse effect. *Nature*, 342, 1989, S. 758-761
- Regierungserklärung des Bundeskanzlers vor dem Deutschen Bundestag, in: Presse- und Informationsamt der Bundesregierung (Hrsg.), Bulletin Nr. 27, Bonn, den 19.03.87, S. 213
- Reichle, H.G., Jr. u. a.: Carbon monoxide measurements in the troposphere. *Science*, Band 218, 1982, S. 1024-1026
- Reichle, H.G., Jr. u. a.: The distribution of middle tropospheric carbon monoxide during early October 1990. *J. Geophys. Res.*, im Druck
- Revelle, R.R.: Methane hydrates in continental slope sediments and increasing atmospheric carbon dioxide. In „Changing Climates“, National Academy Press, Washington, D.C. (USA), 1983, S. 252-261
- Rijkswaterstaat: A Global Survey of Coastal Wetlands, their Functions and Threats in Relation to Adoptive Responses to Sea Level Rise. Bericht für IPCC Arbeitsgruppe 3, Bericht No. GWWS-90, 1990
- Rind, D.; Goldberg R. und Ruedy R.: Change in climate variability in the 21st century. *Climate Change*, 14, 1989, S. 5-37
- Rinsland, C.P.; Johnson, D.W.; Godman, A.; Levine, J.S.: Evidence for a decline in the atmospheric accumulation rate of CHClF<sub>2</sub> (CFC-22). *Nature*, Band 337, 1989, S. 535-537
- Rinsland, C.P.; Levine, J.S.: Free tropospheric carbon monoxide concentrations in 1950 and 1951 deduced from infrared total column amount measurements. *Nature* Band 318, 1985, S. 250-254
- Robbins, R.C.; Cavanagh, L.A.; Salas, L.J.; Robinson, E.: Analysis of ancient atmospheres. *J. Geophys. Res.* Band 78, 1973, S. 5341-5344
- Roberts, J.M.; Fehsenfeld, F.C.; Albritton, D.L.; Sievers, R.E.: Measurements of monoterpene hydrocarbons at Niwot Ridge, Colorado. *J. Geophys. Res.*, Band 88, 1983, S. 10667-10678
- Robertson, G.P.; Tiedje, J.M.: Deforestation alters denitrification in a lowland tropical rain forest. *Nature*, Band 336, 1988, S. 756-759
- Robinson, E. u. a.: Long-term air quality monitoring at the South Pole by the NOAA program Geophysical Monitoring for Climate Change. *Rev. Geophys.*, Band 26, 1988, S. 63-80
- Rodgers, J. D. und R. D. Stephens: Absolute infrared intensities for F-113 and F-114 and an assessment of their greenhouse warming potential relative to other chlorofluorocarbons. *J. Geophys. Res.*, 93, 1988, S. 2423-2428
- Roeckel, B.; Zhao, B.; Raschke, E.: A flexible radiative transfer routine for GCM's: Infrared part. In: G.J. Boer (Hrsg.): Research Activities in Atmospheric and Oceanic Modelling. CAS/JSC Working Group on Numerical Experimentation, Report Nr. 9, WMO/TD Nr. 141, 1986, S. 4.62-4.65
- Roeckner, E. u. a.: The Hamburg version of the ECMWF model (ECHAM). In: Boer, G.J. (Hrsg.): Research Activities in Atmospheric and Oceanic Modelling. SAS (JSC Working Group on Numerical Experimentation, WMO/TD-Nr. 332, 1989, S. 7.1-7.4
- Roeckner, E.; Schlese, U.; Biercamp, J.; Löwe, P.: Cloud optical depth feedbacks in climate modelling. *Nature*, Band 329, Nr. 6135, 1987, S. 138-140
- Ronen, D.; Mordechai, M.; Almon, E.: Contaminated aquifers are a forgotten component of the global N<sub>2</sub>O budget. *Nature*, Band 335, 1988, S. 57-59
- Rotmans, J.,; Swart R. S.; Vriee, O. J.: The role of the CH<sub>4</sub>-CO-OH cycle in the greenhouse problem. *The Science of the Total Environment*, Heft 94, S. 233-252
- Rotmans, J.; Eggink, E.: Methane as a greenhouse gas: A simulation model of the atmospheric chemistry of the CH<sub>4</sub>-CO-OH cycle. Bericht Nr. 758471002 RIVM, Bilthoven, 1988
- Rotty, R.M.; Marland, G.: Fossil fuel combustion: Recent amounts, patterns, and trends of CO<sub>2</sub>. In: The changing Carbon Cycle: A Global Analysis. Trabalka, J.R.; Reichle, D.E. (Hrsg.), Springer Verlag, New York, 1986, S. 474-490
- Rotty, R.M.; Marland, G.: Production of CO<sub>2</sub> from fossil fuel burning by fuel type, 1860-1982. Report NDP-006, Carbon Dioxide Information Center, Oak Ridge National Laboratory, UA, 1986
- RWE (Rheinisch-Westfälische Elektrizitätswerke): Ermittlung der „Nutzenergie“ in den Verbrauchssektoren für das Jahr 1988. Firmenmitteilung, Essen 1990.
- Sagan, C.; Toon, O.B.; Pollack, J.B.: Anthropogenic albedo changes and the Earth's climate. *Science* Band 206, 1979, S. 1363-1368
- Salinger, M.J. u. a.: CO<sub>2</sub> and Climate Change. Impacts on Agriculture. New Zealand Met Service, Wellington, New Zealand, 1989
- Sanderson, M. und Wang, L.L.: Climate change and Great Lakes water levels. *JAHSV Publ. No.*, 168, 1987, S. 477-487
- Sanhueza, E.; Hao, W.M.; Scharffe, D.; Donoso, L.; Crutzen, P.J.: N<sub>2</sub>O and NO<sub>x</sub> emissions from soils in the northern part of the Guayana shield, Venezuela. *J. Geophys. Res.*, 1990, Manuskript eingereicht
- Sargent, N.E.: Redistribution of the Canadian boreal forest under a warmed climate. *Climatological Bulletin*, 20, 1988, S. 23-24
- Sarmiento, J.,L.; Orr, J.C.; Siegenthaler, U.: A perturbation simulation of CO<sub>2</sub> uptake in an ocean general circulation model, Manuskript in Vorbereitung
- Sarmiento, J.L.; Siegenthaler, U.; Orr, J.: 3-d ocean models of anthropogenic CO<sub>2</sub> uptake. Extended abstract of paper presented at the third international conference on analysis and evaluation of atmospheric CO<sub>2</sub> data present and past. Hinterzarten, Oct. 16-20, WMO Environmental Pollution Monitoring and Research Programme, Nr. 59, Genf, 1989

- Sausen, R.; Barthel, K.; Hasselmann, K.: Coupled ocean-atmosphere models with flux correction. *Climate Dyn.*, Band 2, 1988, S. 145-163
- Schaefer, H., Geiger, B., Jochem, E., Ott, V.: Emissionsminderung durch rationelle Energienutzung. Zusammenfassung der Ergebnisse des Studienkomplexes A.1, München, Karlsruhe 15.03.1990
- Scheel, H.E.; Brunke, E.G.; Seiler, W.: Trace gas measurements at the monitoring station Cape Point, South Africa, between 1978 and 1988. *J. Atmos. Chem.* Band 11, 1990, im Druck
- Scherhag, R.: *Berl. Deut. Wetterd. (US Zone)*, 38, 1952, S. 51
- Schlesinger, M. E.; Mitchell, J.F.B.: Climate model simulations of the equilibrium climatic response to increased carbon dioxide. *Revs. Geophys.* Band 25, 1987, S. 760-798
- Schlesinger, M.E.; Mitchell, J.F.B. In „Projecting the climatic effects of increasing carbon dioxide“, MacCracken, C.; Luther, F. (Hrsg.) Eds. Department of Energy, Washington, D.C., 1985, S. 81-147
- Schlesinger, M.E.; Mitchell, J.F.B.: Climate model simulations of the equilibrium climatic response to increased carbon dioxide. *Rev. of Geophys.* Band 25, 1987, S. 760-798
- Schlesinger, M.E.; Zhao, Z.C.: Seasonal climatic change introduced by doubled CO<sub>2</sub> as simulated by the OSU atmospheric GCM/mixed-layer ocean model. *J. Climate* Band 2, 1989, S. 429-495
- Schmidbauer, Bernd: „Wir brauchen einen UN-Umweltrat“ (Interview), in: *der Überblick* 1/89, S. 53
- Schmidt, J.; Seiler, W.; Conrad, R.: Emission of nitrous oxide from temperate forest soils into the atmosphere. *J. Atmos. Chem.*, Band 6, 1988, S. 95-115
- Schneider, H. R.; M. K. W. Ko; N. D. Sze; G. Shi und W. C. Wang: An evaluation of the role of eddy diffusion in stratospheric interactive 2D models. *J. Geophys. Res.*, 46, 1989, S. 2079-2093
- Schnug, A.: *Elektrizitätswirtschaft*; in: *Brennstoff, Wärme Kraft*, Düsseldorf 1990
- Schoeberl, M.R.; R.S. Stolarski und A.J. Krueger: The 1988 antarctic ozone depletion: comparison with previous year depletion. *Geophys. Res. Lett.*, 16, 5, 1989, S. 377-380
- Schönwiese, C.-D.; Birrong, W.; Schneider, U.; Ullrich, R.: Statistische Analysen des Zusammenhangs sekularer Klimaschwankungen mit extremen Einflußgrößen und Zirkulationsparametern unter besonderer Berücksichtigung des Treibhausproblems. Bericht Nr. 84, Institut für Meteorologie und Geophysik der Universität Frankfurt am Main, 1990
- Schubert, B.; Schmidt, U.; Ehhalt, D.H.: Sampling and analysis of acetaldehyde in tropospheric air. Proc. 3rd European Symp. on Physico-chemical behaviour of Atmos. Pollutants, Varese, Italy, April 1984, EUR. 9336, 1984, S. 44-52
- Schütz, H., Holzapfel-Pschorn, A., Conrad, R., Renenberg, H.; Seiler W.: A 3-year continuous record on the influence of daytime, season, and fertilizer treatment on methane emission rates from an Italian rice paddy. *J. Geophys. Res.*, Band 94, 1989, S. 16405-16416
- Scotto, J. u. a.: Biologically Effective Ultraviolet Radiation: Surface Measurements in the United States, 1974-1985; *Science*, 239, 1988, S. 762-764
- Scotto, J., T. R. Fears, J. F. Fraumeni: Incidence of Non Melanoma Skin Cancer in the United States. US Department of Health and Human Services, NIH publications, NR. 83-2433, 1983
- Sebacher, D.I.; Harriss, R.C.; Bartlett, K.B.; Sebacher, S.M.; Grice, S.S.: Atmospheric methane sources: Alaskan tundra bogs, an alpine fen, and a subarctic boreal marsh. *Tellus*, Band 38B, 1986, 1-10
- Seiler, W.: The cycle of atmospheric CO. *Tellus*, Band 26, 1974, S. 116-135
- Seiler, W.; Conrad, R.: Contribution of tropical ecosystems to the global budgets of trace gases, especially CH<sub>4</sub>, H<sub>2</sub>, CO, and N<sub>2</sub>O. In „The Geophysiology of Amazonia“, R.E. Dickinson (Hrsg.), John Wiley and Sons, New York, 1987, S. 133-160
- Seiler, W.; Conrad, R.: Field measurements of natural and fertilizer-induced N<sub>2</sub>O release rates from soil. *J. Air Poll. Control Assoc.*, Band 31, 1981, S. 767-772
- Seiler, W.; Fishman, J.: The distribution of carbon monoxide and ozone in the free troposphere. *J. Geophys. Res.* 86, 1981, S. 7255-7265
- Seiler, W.; Giehl, H.; Brunke, E.-G.; Halliday, E.: The seasonality of CO abundance in the Southern Hemisphere. *Tellus*, Band 36 b, 1984, S. 219-231
- Seiler, W.; Junge, C.: Carbon monoxide in the atmosphere. *J. Geophys. Res.*, Band 75, 1970, S. 2217-2226
- Seiler, W.; Schmidt, U.: Dissolved nonconservative gases in seawater. In „The Sea“, Band 5. Goldberg, E.D. (Hrsg.), John Wiley and Sons, New York, 1974, S. 219-243
- Shears, J.H. u. a.: Spectroscopic evidence for a photosensitive oxygenated state of ammonia monooxygenase in whole cells of *Nitrosomonas europaea*. *Biochemical Journal*, 266, 1985, S. 449-507
- Shiklomanov, I.A.: Anthropogenic change of climate, water, resources and water management problems. Conference on Climate and Water, Helsinki, Volume 2, 1988, S. 310-447
- Siegenthaler, U.: Carbon dioxide: it's natural cycle and anthropogenic perturbations. In „The Role of Air-Sea Exchange in Geochemical Cycling“, P. Buat-Ménard (Hrsg.), Reidel Publ. Co., 1986, S. 209-247
- Siegenthaler, U.; Oeschger, H.: Biospheric CO<sub>2</sub> emissions during the past 200 years reconstructed by deconvolution of ice core data. *Tellus* Band 39 B, 1987, S. 140-154
- Simmons, A.J. u. a.: The ECMWF medium-range prediction model-development of the numerical formulations and the impact of increased resolution. *Meteorol. and Atmos. Phys.* Band 40, 1989, S. 28-60

- Singh, H.B.; Viezee, W.; Salas, L.J.: Measurements of selected C2-C5 hydrocarbons in the troposphere: Latitudinal, vertical, and temporal variations. *J. Geophys. Res.*, Band 93, 1988, S. 15861-15878
- Sirconlon, J.H.A.: Variation des debits des cours d'eau, des niveaux des lacs en Afrique de l'ouest depuis le debut du 20 ème siècle. *J.AHS Publ. No.*, 168, 1987, S. 13-25
- Slaper, H.: *Scin Cancer and UV Exposure: Investigations on the Estimation of Risk.* Utrecht 1987
- Slemr, F.; Conrad, R.; Seiler, W.: N<sub>2</sub>O emissions from fertilized and unfertilized soils in a subtropical region (Andalusia/Spain), *J. Atmos. Chem.*, Band 1, 1984, S. 159-169
- Slemr, F.; Seiler, W.: Field measurments of NO and NO<sub>2</sub> emissions from fertilized and unfertilized soils. *J. Atmos. Chem.*, Band 2, 1984, S. 1-24
- Smith, J.B. und Tirpak, D.A.: The potential Effects of Global Climate Change on the United States. Report to Congress, Volume 2 National Studies, EPA, Washington, 1988
- Snider, J.R.; Dawson, G.A.: Tropospheric light alcohols, carbonyls, and acetonitrile: Concentrations in the Southwestern United States and Henry's Law data. *J. Geophys. Res.*, Band 90, 1985, S. 3797-3805
- Sober, A. J.: Solar exposure in the etiology of cutaneous melanoma. *Photodermatology*, 1987, S. 23-31
- Solomon, A. M.: Transient response of forests to CO<sub>2</sub>-induced climatic change: Simulation modeling experiments in eastern North America. *Oecologia Heft* 68, 1986, S. 567-579
- Stakliv, E.Z. und Lins, H.: Impacts of climate change on US water resources, Bericht für IPCC Arbeitsgruppe 2, 1989
- Steele, L.P. u. a.: The global distribution of methane in the troposphere. *J. Atmos. Chem.*, Band 5, 1987, S. 125-171
- Sterenberg, H. J. C. M. und J. C. van der Leun: Action spectra for tumorigenesis by ultraviolet radiation. in: *Human Exposure to Ultraviolet Radiation: Risks and regulations*, W. F. Passchier und B. F. M. Bosnjakovic (Hrsg.) Amsterdam 1987, S. 173-190
- Stuedler, P.A.; Bowden, R.D.; Melillo, J.M.; Aber, J.D.: Influence of nitrogen fertilization on methane uptake in temperate forest soils. *Nature*, Band 341, 1989, S. 314-316
- Stolarski, R.S. und R.J. Cicerone: Stratospheric chlorine: A possible sink for ozone. *Can. J. Chem.* Band 52, 1974, S. 1610-1615
- Stordal, F. und I.S.A. Isaksen: Ozone perturbations due to increases in N<sub>2</sub>O, CH<sub>4</sub>, and chlorocarbons: two-dimensional time-dependent calculations. *Tellus*, 39 B, 1987, S. 333-353
- Stordal, F.; I.S.A. Isaksen und K. Hornrveth: A diabatic circulation two-dimensional model with photochemistry simulations of ozone and long-lived tracers with surface sources. *J. Geophys. Res.*, 90, 1985, S. 5757-5776
- Stouffer, J.; Manabe, S.I.; Bryan, K.: On the climate change induced by a gradual increase of atmospheric carbon dioxide. *Nature* Band 342, 1989, S. 660-662
- Sughandly, A.: Preliminary Findings on Potential Impact of Climate Change in Indonesia. Bericht an IPCC, Arbeitsgruppe 2 im September 1989; Tsukuba, Japan, 1989
- Sullivan, J.H. und A.H. Teramura: Field study of the interaction between solar ultraviolet-B-radiation and drought on photosynthesis and growth in soybean. *Plant Physiology* 92, 1990, S. 141-146
- Svensson, B.H.; Rosswall, T.: In situ methane production from acid peat in plant communities with different moisture regimes in a subarctic mire. *Oikos*, Band 43, 1984, S. 341-350
- Swinnerton, J.W.; Lamontagne, R.A.; Linnenbom, V.J.: Carbon monoxide in rainwater. *Science*, Band 172, 1971, S. 943-945
- Sze, N. D. und M. K. W. Ko: Photochemistry of COS, CS<sub>2</sub>, CH<sub>3</sub>SCH<sub>3</sub> and H<sub>2</sub>S: Implication for the atmospheric sulfur cycle. *Atmos. Environ.*, 14, 1980, S. 1223-1239
- Sze, N.D.; M.K.W. Ko; D.K. Weisenstein; J.M. Rodriguez; R.S. Stolarski und M.R. Schoeberl: Antarctic ozone hole: possible implications for ozone trends in the Southern Hemisphere. *J. Geophys. Res.* 94, 1989, S. 11521
- Tans, P.P.; Conway, T.J.; Nakasawa, T.: Latitudinal distribution of sources and sinks of atmospheric carbon dioxide. *J. Geophys. Res.*, Band 94, 1989, S. 5151-5172
- Taylor, H. R., S. K. West, F. S. Rosenthal, M. Beatriz, H. S. Newland, H. Abbey und E. A. Emmett: Effect of ultraviolet radiation on cataract formation. *New England Journal of Medicine*, 319, 1988, S. 1429-1433
- Tevini, M. u. a.: Action and action mechanisms of enhanced solar and artificial UV-B.radiation on growth, composition and function of crop plants. Final report 1989, Gesellschaft für Strahlen- und Umweltforschung, München 1989
- Tevini, M.; Braun, J.; Grusemann, P. und Ros, J.: UV-Wirkungen auf Nutzpflanzen. in: *Laufener Seminarbeiträge* 3, 1988, Akademie für Naturschutz und Landschaftspflege, Laufen/Salzach 1989, S. 38-52
- TFAP-PAFT: Tropical Forestry Action Plan-Report of the Independent Review, Kuala Lumpur (Malaysia) 1990, S. 51
- Thatcher, Margaret: Klima und Umwelt, in: *Britische Dokumentation D 13/90* (Hrsg. Britische Botschaft ), Bonn 1990
- The Noordwijk Declaration On Atmospheric Pollution & Climatic Change, Noordwijk 1989
- Thompson, A.M; Cicerone, R.J.: Possible perturbations to atmospheric CO, CH<sub>4</sub>, and OH. *J. Geophys. Res.* Band 91, 1986, S. 10 853-10 864
- Thompson, M.L., Enting, G., Pearman, G.I.; Hyson, P.: Interannual variation of atmospheric CO<sub>2</sub> concentration. *J. Atmos. Chem.*, Band 4, 1986, S. 125-155

- Thomsen: The effect of climate variability and change on groundwater in Europe. Conf. on Climate and Water, Helsinki. Vol. 1, 1989, S. 486-500
- Tickell, Sir Crispin : Global Climate Change. Rede vor dem Economic and Social Council der Vereinten Nationen am 8. Mai 1989
- Tickell, Sir Crispin: Environmental Refugees. National Environment Research Council, Annual Lecture, Royal Society, London, Großbritannien, 1989
- Titus, J.G.: Greenhouse Effect, Sea Level Rise and Barrier Islands. Management, 1990, S. 18
- Tolbert, D.T. und Zelitch I.: Carbon metabolism in CO<sub>2</sub> and plants: The response of plants to rising levels of atmospheric carbon dioxide. in: Lemon (Hrsg.) Westview Press, 1983, Boulder
- Trabalka, J.R. (Hrsg.): Atmospheric carbon dioxide and the global carbon cycle. U.S. Department of Energy, DOE/ER-0239, Washington, D.C., 1985
- Trenberth, K.E.; Christy, J.R.; Olson, J.G.: Global atmospheric mass, surface pressure and water vapour variations. J. Geophys. Res. Band 92, 1987, S. 14 815-14 826
- Tricot, D.; Berger, A.: Modelling the equilibrium and transient responses of global temperature to past and future trace gas concentrations. Climate Dynamics Band 2, 1987, S. 39-61
- Troadec, J.P.: Report of the Climate and Fisheries Workshop. Glantz (Hrsg.), NCAR, 1989, S. 7-8 und 16
- Tung, K. K. und Yang: J. Geophys. Res. 93, 1988
- Twomey, S.: The influence of pollution on the short-wave albedo of clouds. J. Atm. Sci. Band 34, 1977, S. 1149-1152
- Twomey, S.; Piepgrass, M.; Welfe, T.L.: An assessment of the impact of pollution on global cloud albedo, Tellus, Band 36 B, 1984, S. 356-366
- Umweltbundesamt: Berichte 7/89 „Verzicht aus Verantwortung: Maßnahmen zur Rettung der Ozon-schicht“, Erich Schmidt Verlag Berlin 1989
- UN-General Assembly (Second Committee: Development and International Economic Co-Operation: Environment): United Nations Conference on Environment and Development 1992
- UN-General Assembly: Resolution 43/53 vom 6. Dezember 1988
- UN-Resolution 2997 (XXVII) Institutionelle und finanzielle Maßnahmen für die internationale Zusammenarbeit auf dem Gebiet der Umwelt vom 15. Dezember 1972, in: Kilian, Michael: Umweltschutz durch internationale Organisationen, Berlin 1987
- UNEP/WMO: Policymakers Summary of the Scientific Assessments of Climate Change. Rpt. to IPCC from Working Group 1, Bracknell, Großbritannien, 1990
- UNEP: Governing Council-Draft Devison „Global Climate Change“ (UNEP/GC.15/L.22/Add.3), Nairobi, 24. May 1989
- UNEP: Montreal protocol on substances that deplete the ozone layer. United Nations Environmental Programme, Nairobi, 1987
- UNEP: Criteria for Assessing Vulnerability to Sea level Rise: A Global Inventory to High Risk Areas; UNEP und Regierung der Niederlande, Entwurf, 1989
- Usher, Peter (UNEP): The International Response To Climate Change, Konferenz-Unterlage für den Weltkongreß „Klima und Entwicklung“ in Hamburg vom 7.-10.11.1988
- Van Devender, T.R. und Spaulding, W.G.: Development of vegetation and climate in the southwestern United States. Science, 204, 1979, S. 701-710
- Varanasi, P. und S. Chudamani: Infrared intensities of some chlorofluorocarbons capable of perturbing the global climate. J. Geophys. Res., 93, 1988, S. 1666-1668
- Vaughan, G.: Stratosphere-Troposphere exchange of ozone, In „Tropospheric Ozone-Regional and Global Scale Interactions, I.S.A. Isaksen (Hrsg.), NATO ASI Series C, Band 227, Reidel Publishing Comp., Dordrecht, Holland, 1988, S. 125-135
- Vinnikov, K.Y.; Groisman, P.Y.; Lugina, K.M.: The empirical data on modern global climate changes (temperature and precipitation). J. Climate, 1990, im Druck
- Volz-Thomas, A.; Kley, D.: Ozone measurements in the 19th century: An evaluation of the Montsouris series. Nature Band 332, 1988, S. 240-242
- Vupputuri, R. K. R.: Potential effects of anthropogenic trace gas emissions on atmospheric ozone and temperature structure and surface climate. Atmos. Environ., 22, 1988, S. 2809-2818
- Wagenbach, D.; Münnich, K.O.; Schotterer, U.; Oeschger, H.: The anthropogenic impact on snow chemistry at Colle Gnifetti, Swiss Alps. Ann. Glaciology Band 10, 1988, S. 183-187
- Wahlen, M. u. a.: Carbon-14 in methane sources and in atmospheric methane: Contribution from fossil carbon. Science, Band 245, 1989, 286-290.
- Wall, G.: Implications of Climatic Change for Tourism and Recreation in Ontario. Environment Canada, CCD 88-05, Downsview, Ontario Canada, 1988
- Wang, W.-C. und N. D. Sze: Coupled effects of atmospheric N<sub>2</sub>O and O<sub>3</sub> on the earth's climate. Nature, 286, 1980, S. 589-590
- Wang, W.-C.; G. Molnar; M. K. W. Ko; S. Goldenberg und N. D. Sze: Atmospheric trace gases and global climate: a seasonal model study. Tellus 42 B, 1990, S. 149-161
- Warneck, P.: C chemistry of the natural atmosphere. International Geophysics Series Band 41, Academic Press (ISBN-12-43-5 630-4), Orlando, San Diego, London, 1988
- Washington, W.M. und Meehl, G.A.: Climate sensitivity due to increased CO<sub>2</sub>: experiments with a coupled

- atmosphere and ocean general circulation model. *Climate Dynamics*, 4, 1989, S. 1-38
- Wathne, B.M.: Measurements of benzene, toluene and xylenes in urban air. *Atmos. Environ.*, Band 17, 1983, S. 1713-1722
- Watson, R. T. and Ozone Trend Panel; M. J. Prather and Ad Hoc Theory Panel, M. J. Kurylo and NASA Panel for Data Evaluation, 1988: Present state of knowledge of the upper atmosphere 1988: an assessment report. NASA Reference Publication 1208. Washington, D.C.
- Weidick, A.: Review of glacier changes in West Greenland. *Z. Gletscherk. Glazialgeol.* Band 21, 1984, S. 301-309
- Weiss, R.F.: The temporal and spatial distribution of tropospheric nitrous oxide. *J. Geophys. Res.*, Band 86, 1981, S. 7185-7195.
- Weltkommission für Umwelt und Entwicklung: Unsere gemeinsame Zukunft, Greven 1987
- Wetherald, R.T.; Manabe, S.: Cloud feedback processes in a general circulation model. *J. Atmos. Sci.* Band 45, 1988, S. 1397-1415
- Whalen, S.C.; Reeburgh, W.S.: A methane flux times series for tundra environments. *Global Biogeochem. Cycles*, Band 2, 1988, S. 399-410
- Wheaton, E.E. u. a.: An Exploration and Assessment of the Implications of Climatic Change for the Boreal Forest and Forestry Economies, Saskatchewan Research Council, Saskatoon, Saskatchewan, 282 Seiten, 1987
- Wigley, T.M.L.: Relative contributions of different trace gases to the greenhouse effect. *Climate Monitor* Band 16 (1), 1987, S. 14-28
- Wigley, T.M.L.: Possible Climate Change due to SO<sub>2</sub>-derived cloud condensation nuclei. *Nature* Band 339, 1988, S. 365-367
- Wigley, T.M.L.; Raper, S.C.B.: Thermal expansion of sea water associated with global warming. *Nature* Band 330, 1987, S. 127-131
- Wilson, C.A. und Mitchell J.F.B.: A doubled CO<sub>2</sub> climate sensitivity experiment with a global climate model including a simple ocean. *J. Geophys. Res.*, 92, 1987, S. 13315-13343
- Wilson, C.A.; Mitchell, J.F.B.: Simulated climate and CO<sub>2</sub> induced climate change over western Europe. *Climate Change* Band 10, 1987, S. 11-42
- Winkler, P.: Meridionalverteilung des bodennahen Ozons über dem Atlantik. *Ann. Meteorol.*, Band 15, 1980, S. 241-242
- Winkler, P.; Kaminski U.: Increasing submicron particle mass concentration at Hamburg. *Observation Atm. Env.*, Band 22, 1988, S. 2871-2878
- Wirtschaftserklärung von Paris, in: Presse- und Informationsamt der Bundesregierung (Hrsg.) (Bulletin Nr. 76), Bonn, den 19. Juli 1989
- Wirtschaftserklärung der Staats- und Regierungschefs aus der Bundesrepublik Deutschland, Frankreich, Großbritannien, Italien, Japan, Kanada und den Vereinigten Staaten sowie von Vertretern der Europäischen Gemeinschaft zum Wirtschaftsgipfel in Toronto, in: Europaarchiv 14/1988, D 386
- Wirtschaftserklärung von Houston, in: Presse- und Informationsamt der Bundesregierung (Hrsg.): Wirtschaftsgipfel Houston-Treffen der Staats- und Regierungschefs vom 9. bis 11. Juli 1990, (Bulletin Nr. 91), Bonn, den 13. Juli 1990
- WMO/UNEP Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC): Bericht der Arbeitsgruppe I „Scientific Assessment of Climate Change“, Draft report. März 1990
- WMO: Atmospheric ozone 1985, WMO global ozone research and monitoring project. Report No 16., World Meteorological Organization, Genf, 1986 1181 Seiten
- WMO: Report of the NASA/WMO ozone trends panel, Global Ozone Research and Monitoring Project, Report 18, WMO, 1989, Genf
- WMO: Scientific Assessment of Stratospheric Ozone. 1989, Volume 1: World Meteorological Organization; Global Ozone Research and Monitoring Project. Report No. 20, 1, 1990
- Wofsy, S.C.; M.B. McElroy und Y.L. Yung: The chemistry of atmospheric bromine. *Geophys. Res. Lett.*, 2, 1975; S. 215-218
- Wofsy, S.C.; McConnell, J.C.; McElroy, M.B.: Atmospheric CH<sub>4</sub>, CO and CO<sub>2</sub>. *J. Geophys. Res.*, Band 77, 1972, S. 4477-4493
- World Resources Institute: World Resources 1988-89, Basic Books, Inc., New York, 1988
- Wuebbles, D. J.; F. M. Luther und J. E. Penner: Effect to coupled anthropogenic perturbations on stratospheric ozone. *J. Geophys. Res.*, 88, 1983, S. 1444-1456
- Wuebbles, D.J., Grant, K.E., Connell, P.S. und Penner, J.E.: The role of atmospheric Chemistry in climate change. *J. Air Poll. Control Assoc.*, Band 39, 1989, S.22-28
- Zander, R.; Demmoulin, Ph.; Ehhalt, D.H.; Schmidt, U.; Rinsland, C.P.: Secular increases in the total vertical abundance of carbon monoxide above Central Europe since 1950: *J. Geophys. Res.*, Band 94 b, S. 11021-11028
- Zardini, D.; Raynaud, D.; Scharffe, D.; Seiler, W.: N<sub>2</sub>O measurements of air extracted from Antarctic ice cores: Implications of atmospheric N<sub>2</sub>O back to the last glacial-interglacial transition. *J. Atmos. Chem.* Band 8, 1989, S. 189-201
- Zdankowski, W. G., R. M. Welch und G. Korb: An investigation of the structure of typical two-stream-methods for the calculation of solar fluxes and heating rates in clouds. *Beitr. Phys. Atmos.*, 53, 1980, S. 147-166
- Zebiak, S.E.; Cane, M.A.: A model El Nino-Southern Oscillation. *Mon. Weather Rev.* Band 115, 1987, S. 2262-2278

Zellner, R.: in: Anthropogene Beeinflussung der Ozonschicht DEHEMA-Fachgespräche Umweltschutz. Dr. Behrens, J. Wiesner (Hrsg.), 1988, S. 77-100

Zellner, R.: Oxid. Communications 9, 1986, S. 255

Zellner, R.; Weibring, G.: Atmospheric in-situ photochemical formation of N<sub>2</sub>O. Nature, Manuskript eingereicht

Zellner R.: Chemie über den Wolken-Anthropogene Störung (Beeinflussung) des stratosphärischen Ozons, 1990, in Vorbereitung

Zimmerman, P.; Chatfield, R.B.; Fishman, J.; Crutzen, P.J.; Hanst, P.L.: Estimates on the production of CO and H<sub>2</sub> from the oxidation of hydrocarbon emissions from vegetation. Geophys. Res. L., Band 5, 1978, S. 679-682

Zimmermann, P. H.; J. Feichter; H. K. Rath; P. J. Crutzen und W. Weiss: A global three-dimensional source-receptor model investigation using 85Kr. Atmos. Environ., 23, 1989, S. 25-35

Zwally, H.J.: Growth of Greenland ice sheet: Interpretation, Science Band 246, 1989, S. 1589-1591

## 2. Begriffserläuterungen

### Absorption von Strahlung:

Aufnahme von Strahlungsenergie durch einen festen Körper, eine Flüssigkeit oder ein Gas; hierbei wird die Energie aufgenommen und in eine andere Energieform, meist in Wärme, umgewandelt.

### Absorptionskapazität:

Unter Absorptionskapazität wird die Fähigkeit eines Entwicklungslandes verstanden, die ihm gewährte finanzielle und technische Unterstützung wie auch die Nahrungsmittelhilfe sinnvoll aufnehmen und verwenden („absorbieren“) zu können.

### Adiabatischer Temperaturgradient:

Vertikales Temperaturprofil der Atmosphäre, bei dem der Energiegehalt eines aufsteigenden Luftpakets gleich ist. Sein Zahlenwert in der Atmosphäre – ohne flüssiges Wasser – nimmt mit zunehmender Höhe alle 100 µm um ca. 1 °C ab.

### Advektion von Luftmassen:

Horizontaler Transport von Luftmassen.

### Aerosol:

Feste oder flüssige Teilchen in der Luft, außer Wasser- und Eispartikeln, im Größenbereich zwischen 0,1 und 10 µm.

### Albedo:

(Reflexionsvermögen), Verhältnis von reflektierter zu einfallender Sonnenstrahlung in einer bestimmten Wellenlänge und eines Spektralbereiches, angegeben für eine bestimmte Oberfläche (z. B. Savannenboden, Meeresoberfläche, Schnee oder das System Erde/Atmosphäre als Ganzes).

### Alkaloid:

Vorwiegend giftige stickstoffhaltige Verbindung pflanzlicher Herkunft.

### Allgemeines Zoll- und Handelsabkommen (General Agreement on Tariffs and Trade, GATT):

Das Allgemeine Zoll- und Handelsabkommen ist ein im Rahmen der Vereinten Nationen vereinbarter multinationaler Vertrag mit dem Ziel, die Hemmnisse im internationalen Handel abzubauen. Das GATT wird seit dem 1. Januar 1948 angewendet. Gegenwärtig gehören dem GATT 96 Länder als Vollmitglieder an (die Bundesrepublik Deutschland seit 1951), ein Land (Tunesien) ist vorläufig beigetreten, und 28 Länder wenden das GATT de facto an.

Das Allgemeine Zoll- und Handelsabkommen enthält folgende Hauptgrundsätze: Der zwischenstaatliche

Handel soll auf der Basis der Nichtdiskriminierung erfolgen. Insbesondere sind alle Vertragsparteien bei der Erhebung von Einfuhr- und Ausfuhrzöllen und entsprechenden Abgaben an das Prinzip der → Meistbegünstigung gebunden. Der Schutz der einheimischen Industrie ist ausschließlich durch Zölle zu gewährleisten. Mengenmäßige Beschränkungen und sonstige → Nichttarifäre Handelshemmnisse sind grundsätzlich untersagt. Sie sind nur in bestimmten Ausnahmefällen zulässig, unter anderem zum Schutz der Zahlungsbilanz. Streitigkeiten sind nach den im GATT vorgesehenen Verfahren beizulegen.

Das GATT ist vor allem als Forum für internationale Verhandlungen über den Abbau von Handelsschranken hervorgetreten. In den ersten sechs Verhandlungsrunden stand die Senkung der Zölle im Vordergrund. Besonders erfolgreich war die Kennedy-Runde (1964–1967), in der das durchschnittliche Zollniveau aller bedeutenden Industrieländer für gewerbliche Waren um mehr als ein Drittel herabgesetzt wurde. In der Tokyo-Runde (1973–1979) ging es erstmals gleichrangig um die Beseitigung und Verhinderung Nichttarifärer Handelshemmnisse. Die achte Verhandlungsrunde von Uruguay ist zur Zeit unterbrochen.

### Anthropogen [griech. anthropos = Mensch und griech. genes = hervorbringend, hervorgebracht]:

Durch menschliche Einwirkungen verursacht oder ausgelöst.

### Antizyklone:

Hochdruckgebiet

### Artendiversität:

Artenvielfalt.

### Assimilation von Kohlenstoff:

Einbau des im CO<sub>2</sub> der Atmosphäre enthaltenen Kohlenstoffs durch die Photosynthese in die → Biomasse der Pflanzen.

### Atmosphäre [griech. atmos = Dunst, Dampf und griech. sphaira = (Erd) Kugel]:

Die gasförmige Hülle eines Himmelskörpers, speziell die Lufthülle der Erde. Nach der mittleren vertikalen Temperaturverteilung ergibt sich eine Gliederung der Atmosphäre in folgende Schichten: Troposphäre – Unterster Bereich der Atmosphäre; hier finden die wesentlichen Wettervorgänge statt. Die Troposphäre reicht bis zu der in Höhen zwischen 8 und 17 km liegenden Tropopause. Stratosphäre – Sie beginnt oberhalb der Tropopause und erstreckt sich bis zur Stratopause in etwa 50 km Höhe. In der Stratosphäre befindet sich die Ozonschicht. Die Hauptbestandteile



der Erdatmosphäre sind Stickstoff, Sauerstoff, Argon sowie Wasserdampf und Kohlendioxid.

#### **Atmosphärisches Strahlungsfenster:**

Bereich der Infrarot-Strahlung, in dem der Wasserdampf der Atmosphäre wenig Strahlung absorbiert und die rückgestreute Strahlung daher in den Welt- raum gelangt. Viele → Treibhausgase hingegen ab- sorbieren hier die Infrarot-Strahlung stärker, so daß der Konzentrationsanstieg ersterer zu einer zusätzli- chen Erwärmung der Atmosphäre führt.

Anpflanzen von Bäumen auf Flächen, auf denen zuvor kein Wald gestanden hat.

#### **Bilaterale Zusammenarbeit:**

Bilaterale Zusammenarbeit meint öffentliche Ent- wicklungsleistungen, die ein Staat einem anderen di- rekt, das heißt nicht über multilaterale Organisationen gewährt. Die Partner werden dabei als Geberland und Empfängerland bezeichnet.

#### **Biomasse:**

Die gesamte Masse an lebenden Organismen einer Art oder aller Arten in einer Gesellschaft oder in ei- nem Stand, gemessen zu einem bestimmten Zeit- punkt. Die Biomasse setzt sich zusammen aus der pflanzlichen (Phytomasse) und der tierischen (Zoomasse) Biomasse. Die Masse toter und abgefalle- ner Pflanzenteile wird oft zusätzlich ermittelt und als „tote“ Biomasse angegeben.

#### **Biomassendichte:**

Dichte der → Biomasse, hier im allgemeinen die → Biomasse ganzer Wälder.

#### **Biosphäre:**

Der gesamte von Organismen bewohnte Teil der Erd- oberfläche, der eine dünne Oberflächenschicht und das Meer umfaßt.

#### **Biotop:**

Die Gesamtheit der lebenswirksamen Umweltfakto- ren des Standortes einer Lebensgemeinschaft → Bio- zoenose.

#### **Biozoenose:**

Gemeinschaft der einem → Biotop angehörenden Le- bewesen.

#### **Bodenerosion:**

Die Abtragung des Bodens durch Wasser, Eis, Schnee, Wind und Schwerkraft.

#### **Bodenfeuchte:**

Anteil des Wassers an der gesamten Bodensubstanz.

#### **Boreal:**

Nördlich; dem nördlichen Klima Europas, Asiens und Amerikas zugehörig.

#### **Bruttoinlandsprodukt (BIP):**

Das Bruttoinlandsprodukt, ein Begriff aus der volks- wirtschaftlichen Gesamtrechnung, mißt die gesamte Enderzeugung von Gütern und Dienstleistungen, die innerhalb der Landesgrenzen sowohl von Gebietsan- sässigen als auch von Ausländern erstellt werden. Ausgehend vom → Bruttosozialprodukt ergibt sich das Bruttoinlandsprodukt nach Abzug der Erwerbs- und Vermögenseinkommen der Inländer im Ausland und Addition der entsprechenden Einkommen der Ausländer im Inland (maßgeblich ist im allgemeinen der ständige Wohnsitz). Unberücksichtigt bleibt da- bei, ob das Verfügungsrecht über diese Leistungen Inländern oder Ausländern zusteht.

#### **Bruttosozialprodukt (BSP):**

Das Bruttosozialprodukt ist, von seiner Verwendung her definiert, der Wert aller Güter und Dienstleistun- gen, die in einer Volkswirtschaft während einer be- stimmten Periode konsumiert, investiert oder expor- tiert werden, abzüglich der Importe.

Die Definition des BSP von der Verteilungsseite her geht aus folgendem Schema hervor:

Einkommen aus unselbständiger Arbeit  
Einkommen aus Unternehmertätigkeit und Vermö- gen

---

Nettosozialprodukt zu Faktorkosten = Volksein- kommen  
+ Indirekte Steuern  
– Subventionen

---

Nettosozialprodukt zu Marktpreisen  
+ Abschreibungen

---

Bruttosozialprodukt zu Marktpreisen

Die Höhe des BSP gilt als Gradmesser für die wirt- schaftliche Leistung einer Volkswirtschaft. Das BSP pro Kopf wird als Gradmesser für den Lebensstandard in dem jeweiligen Land verwandt. Es sagt jedoch nichts über die Verteilung des Sozialprodukts und damit über den Lebensstandard im einzelnen aus.

#### **Bundesministerium für wirtschaftliche Zusammenarbeit (BMZ):**

Dieses 1961 geschaffene Ministerium ist für die deut- sche Entwicklungspolitik verantwortlich. Die Aufga- ben des Ministeriums sind: Planung, Abstimmung und Verhandlung mit den Entwicklungsländern, Fi- nanzierung, Steuerung, Koordinierung mit Nicht-Re- gierungsorganisationen, Abstimmung mit anderen Gebern, Kontrolle der Verwendung der Entwick- lungshilfegelder.

**CO<sub>2</sub>-Düngungseffekt:**

Verstärkung des Pflanzenwachstums durch eine höhere CO<sub>2</sub>-Konzentration in der Atmosphäre.

**Cyanobakterien:**

Blualgen; einzellige zu Kolonien oder Zellflächen verbundene pflanzliche Organismen; eine sehr alte, primitive Pflanzengruppe.

**Degradierung/Degradation:**

Veränderung der → Biomassendichte von Wäldern oder des typischen Profils eines Bodens durch menschliche Eingriffe, durch Änderung des Klimas, der Pflanzendecke oder der Bodenbesiedlung. Die Degradierung ist oft mit einem Rückgang der Bodenfruchtbarkeit verbunden.

**Denitrifikation:**

Mikrobieller Stickstoffabbau, d. h. Reduktion von Nitrat (NO<sub>3</sub>) zu atmosphärischem Stickstoff (N<sub>2</sub>) oder zu Distickstoffoxid (N<sub>2</sub>O).

**Deuterium:**

schwerer Wasserstoff (D); radioaktives Isotop des Wasserstoffs mit einem Proton und einem Neutron im Kern.

**Deposition:**

Ablagerung auf Oberflächen.

**Desertifikation:**

Ausweitung der Wüsten oder Entstehung wüstenähnlicher Bedingungen.

**Deutsche Gesellschaft für Technische Zusammenarbeit (GTZ):**

Die GTZ wickelt für die Bundesregierung Projekte der → Technischen Zusammenarbeit ab. Die GTZ ist mit ihren 40 Millionen DM Stammkapital im Besitz des Bundes. Sie ging Anfang 1975 aus der Zusammenlegung der „Bundesstelle für Entwicklungshilfe“ (BfE) und der „Deutschen Förderungsgesellschaft für Entwicklungsländer“ (GAWI) hervor.

Ziel ihrer Tätigkeit ist es Produktion und Beschäftigung in der Landwirtschaft, im Bergbau, im Energiesektor und in der gewerblichen Wirtschaft der Entwicklungsländer zu steigern, die Länder beim Aufbau geeigneter Produktions-, Kredit- und Absatzorganisationen und -systeme zu unterstützen, beim Auf- und Ausbau ihres allgemeinen und beruflichen Bildungswesens mitzuwirken, sie bei ihrer Entwicklungsplanung zu beraten und die Effizienz ihrer Verwaltung zu verbessern.

Die Zusammenarbeit wird in Projekten realisiert, die fast alle Bereiche der Wirtschaft und Gesellschaft in den Entwicklungsländern berühren. Die GTZ ist dabei vor allem verantwortlich für die Entsendung und Finanzierung von Fachkräften, die Lieferung von Ausrüstung und Material für die geförderten Projekte, die Aus- und Fortbildung einheimischer Fach- und

Führungskräfte und die finanzielle Beteiligung an Projekten und Programmen leistungsfähiger Träger in Entwicklungsländern. Zur Durchführung dieser Aufgaben bedient sich die GTZ u. a. privater Consultingunternehmen. Organe der Gesellschaft sind die Gesellschaftsversammlung, der Aufsichtsrat und die Geschäftsleitung.

Die Überprüfung von Planungen, Projekten und Programmen auf deren voraussichtliche bzw. tatsächliche Wirksamkeit wird Evaluierung genannt (von: Evaluation – Wertbestimmung).

**Diatomeen:**

Kieselalgen; Algengruppen, deren charakteristisches Merkmal ein Kieselsäurepanzer ist.

**Diffusion:**

Vermischung von verschiedenen festen, flüssigen oder gasförmigen Stoffen durch selbständige Bewegung ihrer Teilchen, gemäß der kinetischen Gastheorie, wonach sich alle Teilchen in lebhafter Wärmebewegung befinden.

**Diversifizierung:**

Erweiterung der Produktpalette. Sie soll die Anfälligkeit durch Umsatzeinbrüche in Einzelbereichen von Unternehmen verhindern.

**Dobson-Einheit:**

(Dobson-Units, DU) Maß für die Ozongesamtmenge über einer bestimmten Stelle der Erdoberfläche. 100 DU entsprechen einer Luftschicht von 1 mm Dicke bei Atmosphärendruck (1013 hPa) und einer Temperatur von 298 K.

**Dritte Welt:**

Dritte Welt ist im allgemeinen Sprachgebrauch die Bezeichnung für Entwicklungsländer. Für den Ursprung dieses Ausdrucks gibt es mehrere Erklärungen. Die gebräuchlichste spricht von einer Einteilung der Welt in die Erste (westliche), die Zweite (östliche) und die Dritte (südliche) Welt.

**EG-Kommission:**

Die Kommission der → Europäischen Gemeinschaften (Sitz Brüssel) wacht als Hüterin der europäischen Verträge über die korrekte Anwendung der Vertragsbestimmungen, macht dem → Rat der EG Entscheidungsvorlagen zur Entwicklung der Gemeinschaftspolitik (Vorschlagsmonopol) und setzt als Exekutivorgan die Gemeinschaftspolitik auf der Grundlage der Ratsentscheidungen oder in direkter Anwendung der Vertragsbestimmungen ins Werk.

Die Kommission besteht aus 14 gleichberechtigten Mitgliedern, von denen die großen Länder (Bundesrepublik Deutschland, Frankreich, Großbritannien, Italien) je zwei, die übrigen EG-Staaten je ein Mitglied stellen. Die Kommissionsmitglieder werden von den Regierungen der Mitgliedsstaaten im gegenseitigen Einvernehmen ernannt. Sie sollen ihre Aufgaben in voller Unabhängigkeit von den nationalen Regierun-

gen wahrnehmen. Die Kommission arbeitet nach dem Kollegialprinzip; Entscheidungen werden mit einfacher Mehrheit getroffen.

#### EG-Richtlinien:

In den Römischen Verträgen der → Europäischen Gemeinschaft wurde festgelegt, daß kein Mitgliedsland durch nationale Gesetzgebung Wettbewerbsnachteile für die Produkte aus anderen Mitgliedsstaaten schaffen darf. Deshalb verpflichteten sich die Mitgliedsstaaten, die von ihnen gemeinsam erarbeiteten Richtlinien, nach deren Verabschiedung im EG-Ministerrat, durch entsprechende nationale Gesetze auszufüllen. Bei Umweltbelastungen sind Regelungen auf Gemeinschaftsebene besonders notwendig, da zum einen die Belastungen nicht an den Grenzen halten, zum anderen unterschiedliche Umweltauflagen zu Wettbewerbsverzerrungen führen.

#### Eiszeit:

Zeitperiode der Erdgeschichte, in der die Temperatur der Erde wesentlich niedriger als heute war, im allgemeinen mehr als 3 °C.

#### El Niño-Ereignis:

Unregelmäßig im Abstand einiger Jahre auftretendes Phänomen, bei dem das Oberflächenwasser der Meere vor der Küste Perus und entlang des äquatorialen Pazifiks wesentlich wärmer ist als im Jahresdurchschnitt.

#### Emission von Spurengasen:

Freisetzen von Spurengasen aus einem Reservoir in der Atmosphäre.

#### Endenergie:

Endenergie ist die Energie, die vom Endverbraucher eingesetzt wird. Dazu gehört in der Regel die meiste → Sekundärenergie, z. B. Kohle-, Mineralöl- und Gasprodukte, Strom und Fernwärme, doch auch direkt nutzbare → Primärenergie, wie z. B. Erdgas. Die Verluste bei der Umwandlung von der Primärenergie in die Endenergie, vor allem bei der Stromerzeugung, sowie der nichtenergetisch genutzte Anteil der Primärenergie machen in der Bundesrepublik Deutschland zusammen z. Z. etwa  $\frac{1}{3}$  der eingesetzten Primärenergie aus, so daß nur etwa  $\frac{2}{3}$  der Primärenergie als Endenergie zur Verfügung stehen.

#### Energiebedingte klimarelevante Spurengase:

Spurengase, die bei der Bereitstellung, Umwandlung und Nutzung von Energie freigesetzt werden und direkt oder indirekt zu Klimänderungen führen. Dazu zählen:

- Kohlendioxid (CO<sub>2</sub>)
- Methan (CH<sub>4</sub>)
- Distickstoffoxid (Lachgas, N<sub>2</sub>O)
- Spurengase, die zur Bildung des Ozons (O<sub>3</sub>) in der Troposphäre beitragen bzw luftchemische Verän-

derungen bewirken, d. h. in erster Linie Stickoxide (NO<sub>x</sub>), Kohlenmonoxid (CO), Kohlenwasserstoffe (CxHy) und Schwefeldioxid (SO<sub>2</sub>)

- weitere auf ihre Klimarelevanz noch im einzelnen zu überprüfende Spurengase.

Die energiebedingten klimarelevanten Spurengase tragen gegenwärtig zu etwa 50 % zum zusätzlichen Treibhauseffekt bei. Kohlendioxid wird weltweit zu etwa 80 % und Methan zu etwa 30 % energiebedingt emittiert. Die für die Bildung des Ozons in der Troposphäre vor allem verantwortlichen Stickoxide (NO<sub>x</sub>) werden in den Industrieländern fast ausschließlich energiebedingt emittiert. Es gibt folgende Möglichkeiten der Reduktion energiebedingter klimarelevanter Spurengase:

→ Energieeinsparung, → Nutzung erneuerbarer Energien/Solartechnik, Nutzung der Kernenergie, Emissionsrückhaltung, Austausch fossiler Brennstoffe, umweltbewußters Verhalten, Konsumverzicht.

#### Energiedienstleistung:

→ Energieeinsparung/Energiedienstleistung.

#### Energieeinheiten und Energieumrechnungsfaktoren:

Die verbindliche Einheit für Energie ist das Joule (J) (SI-Einheit). Es gilt seit 1. Januar 1978 in der Bundesrepublik Deutschland als gesetzliche Einheit. Die Kalorie (cal) und davon abgeleitete Einheiten wie Steinkohleeinheiten (SKE) und Rohöleinheiten (RÖE) (1 SKE = 0,7 RÖE) können für eine Übergangszeit nur noch hilfsweise zusätzlich verwendet werden. 1 Joule (J) = 1 Newtonmeter (Nm) = 1 Wattsekunde (Ws)

#### Gebräuchliche Energieeinheiten sind:

1 Terawattstunde =		
1 TWh = 1 x 10 <sup>9</sup> kWh = 3,6 PH		
		= 0,123 Mio. t SKE;
1 Million Tonnen Steinkohleeinheiten = 1 Mio. t SKE = 29,308 PJ		
		= 8,15 TWh;
1 Exajoule = 1 EJ = 278 TWh		

#### Umrechnungsfaktoren:

	kJ	kWh	kg SKE
1 kJ	—	0,000 278	0,00 034
1 kWh	3 600	—	0,123
1 kg SKE	29 308	8,14	—

#### Energieeinsparung/Energiedienstleistung:

Energieeinsparung wird hier, dem Stand der Diskussion entsprechend, grundsätzlich im Sinne des Energiedienstleistungskonzeptes verstanden. Das heißt, der bisher so genannte Energiebedarf ist auf eine Dienstleistung (z. B. Raumtemperatur, Licht, Kraft) gerichtet, die immer schon durch eine Kombination der Faktoren Energie, Kapital und technisches Wissen erbracht wird. Die optimale Kombination dieser Faktoren hängt von den relativen Kosten ab. Berücksichtigt man die gestiegenen Energiepreise und außer-

dem die externen Kosten der verschiedenen Energieumwandlungsprozesse, so erweist es sich volkswirtschaftlich und umweltpolitisch als sinnvoll, künftig in weitem Umfang Energie durch Investitionen und technisches Wissen zu ersetzen. Energieeinsparung heißt, dieselben Dienstleistungen durch eine effizientere Kombination der verschiedenen Faktoren zu gewährleisten. Dabei sind die Vorleistungen zu berücksichtigen, d. h., der Energieumsatz ist nur dann vermindert, wenn dies auch in der Primärenergiebilanz gilt. Energieeinsparung wird hier als Oberbegriff verstanden: Er umfaßt die Minimierung des Energieeinsatzes für ein gegebenes Niveau von Energiedienstleistungen über die gesamte Prozeßkette – also einschließlich der Umwandlung von → Primärenergie in Endenergie und deren Umwandlung in → Nutzenenergie bzw. die eigentliche Energiedienstleistung. Aufmerksamkeit bei Maßnahmen zur Einsparung von Energie verdienen die Angebots- und die Nachfrage-seite.

### Energiepotentiale:

Es sind vier üblicherweise verwendete Potentialkategorien zu unterscheiden:

- Das theoretische Potential gibt das Angebot der Energiequellen bzw. das Ausmaß der Energieeinsparung nach physikalischen bzw. naturwissenschaftlichen Gesetzmäßigkeiten wieder.
- Das technische Potential ergibt sich aus dem theoretischen Potential unter Berücksichtigung der Wirkungsgrade der verschiedenen Systeme zur Nutzbarmachung der Energiequellen bzw. der Energieeinsparung sowie unter Berücksichtigung anderer technischer Randbedingungen und entspricht dem jeweiligen Stand der Technik.
- Das wirtschaftliche Potential schränkt das technische Potential auf den Anteil ein, der sich unter Einbeziehung der Kosten der jeweiligen Systeme im Vergleich zu den Kosten konkurrierender Systeme als wirtschaftliche konkurrenzfähig erweist.
- Das Erwartungspotential ist die Teilmenge des wirtschaftlichen Potentials, die die Markteinführungsgeschwindigkeiten und andere Einflußfaktoren berücksichtigt und stellt damit das ausgeschöpfte wirtschaftliche Potential dar, das aufgrund der verschiedenen Randbedingungen zu erwarten ist.

### Erneuerbare Energien/Solartechnik:

Unter der Nutzung der erneuerbaren (regenerativen) Energien versteht man die technische Umsetzung der direkten und der indirekten, bereits in der Natur umgewandelten Solarenergieformen. Aus der Solarstrahlung läßt sich z. B. mittels Solarzellen (Photovoltaik) Strom oder mittels Sonnenkollektoren Wärme erzeugen. Die in der Natur umgewandelten Solarenergieformen lassen sich in Form von Wasser- und Windkraft, Umweltwärme, Biomasse, Meereswärme und Gezeitenenergie verwerten. Unter passiver Solarnutzung versteht man die Wandlung der Solarenergie in Wärme direkt im Gebäude bzw. in mit dem Inneren

des Gebäudes in Verbindung stehenden Wandstrukturen. Der jährliche Primärenergieverbrauch der Menschheit, zur Zeit rund  $90 \times 1\,012$  Kilowattstunden (rund 11 Milliarden Tonnen Steinkohleneinheiten), beträgt nur etwa ein Zehntausendstel der auf der Erdoberfläche jährlich einfallenden Sonnenstrahlung. Der Anteil der Landfläche an der Erdoberfläche beträgt etwa 30 Prozent, so daß die jährlich auf die Landfläche der Erde einfallende Solarstrahlung etwa das 3 000fache des Primärenergieverbrauchs der Welt beträgt. Im Prinzip ist ein großes technisches Potential zur direkten und indirekten Nutzung von Solarenergie vorhanden: Würde man langfristig wenige Prozent der Landfläche der Erde, d. h. einige Millionen  $\text{km}^2$ , für eine Energiewandlung der Solarstrahlung mit einem Gesamtwirkungsgrad von durchschnittlich 5 Prozent (einschließlich aller Umwandlungs-, Verteilungs- und Speicherverluste) und zusätzlich einen Teil des technisch nutzbaren Potentials der Wasser- und Windkraft nutzen, so ließe sich das Zwei- bis Dreifache des heutigen globalen Primärenergiebedarfs mit regenerativen Energien decken.

### Entschuldung:

Verzichtserklärung öffentlicher oder privater Gläubiger betreffend Zins- und/oder Tilgungsleistungen der von ihnen gewährten Kredite.

### Entwicklungsdekade:

Die → Vereinten Nationen hatten die Jahre 1961 bis 1970 zur Ersten Entwicklungsdekade erklärt, in der die Voraussetzungen für Stabilität und Wohlstand in der Welt zu schaffen und ein menschenwürdiges Mindestmaß an Lebensstandard durch Fortschritt und Entwicklung auf wirtschaftlichem und sozialem Gebiet zu sichern seien. Die globalen → BSP-Wachstumsziele wurden mit durchschnittlich 5,1 Prozent Wirtschaftswachstums pro Jahr aller Entwicklungsländer fast erreicht. Allerdings wuchs die Bevölkerung in den Entwicklungsländern durchschnittlich um 2,5 Prozent jährlich, und das Wachstum innerhalb der → Dritten Welt verlief sehr ungleichmäßig. Insgesamt wurden die gesteckten Ziele nicht erreicht. Die Jahre 1971 bis 1980 wurden zur Zweiten Entwicklungsdekade erklärt, die Jahre 1981 bis 1990 zur Dritten Entwicklungsdekade.

### Entwicklungsprogramm der Vereinten Nationen (United Nations Development Programme, UNDP):

Das Entwicklungsprogramm der Vereinten Nationen wurde 1965 durch Verschmelzung des Expanded Program of Technical Assistance und des UN Special Fund als Sonderorganisation der Vereinten Nationen für Entwicklungszusammenarbeit gegründet. Die Aufgabe des UNDP ist neben der Gewährung eigener Technischer Hilfe vor allem die Koordinierung der Technischen Hilfe der Sonder- und Fachorganisationen der Vereinten Nationen, die auch die meisten UNDP-Projekte durchführen. Die Schwerpunkte der Tätigkeit liegen auf den Gebieten: Entwicklungsplanung; Erschließung natürlicher Ressourcen; Industrie, Landwirtschaft und öffentliche Verwaltung; Erziehung und Ausbildung; Gesundheit; Zusammenarbeit zwischen Entwicklungsländern.

Im Rahmen des Schutzes der tropischen Wälder ist das UNDP vor allem als einer der Initiativen des Tropenforstwirtschaftsaktionsplans zu nennen.

#### **Enzyme:**

Eiweißstoffe, die in der lebenden Zelle gebildet werden und biochemische Reaktionen in Gang setzen bzw. beschleunigen, ohne selbst dabei verändert zu werden (Katalysatoren).

#### **Erdbahnparameter:**

Parameter, die den Verlauf der Erdbahn bestimmen, wie die → Präzession des sonnennächsten Punktes der Erdbahn und die → Inklination der Erdbachse.

#### **Ernährungs- und Landwirtschaftsorganisation der Vereinten Nationen (Food and Agriculture Organization of the United Nations, FAO):**

Die FAO wurde 1945 als Sonderorganisation der Vereinten Nationen gegründet. Ihre Ziele sind die Verbesserung des Ernährungs- und Lebensstandards in der Welt, die Steigerung der Agrarproduktion, die Verbesserung der Lebensbedingungen für die ländliche Bevölkerung und die Bekämpfung von Hunger und Unterernährung. Zu diesem Zweck fertigt sie Analysen an und gibt politische Handlungsempfehlungen, leistet Technische Hilfe (u. a. in Zusammenarbeit mit dem → Entwicklungsprogramm der Vereinten Nationen) und gewährt Soforthilfe bei Hungerkatastrophen. Die FAO führt eigene Programme durch, versteht sich aber auch als Koordinierungsstelle für Entwicklungsprogramme im gesamten Bereich der Landwirtschaft, Forstwirtschaft und Fischerei. Sitz der Organisation ist Rom. Die Vollversammlung der 156 Mitgliedsstaaten (Stand: Ende 1984) findet alle zwei Jahre statt. Die Kontinuität der Arbeit wird durch das Sekretariat und den Rat gewährleistet, der durch die Repräsentanten von 49 Mitgliedsländern gebildet wird und sich in ständigen Ausschüssen organisiert. Die FAO verfügt über sechs Regionalbüros.

#### **Europäische Gemeinschaften:**

Drei Teilorganisationen fallen unter den Begriff „Europäische Gemeinschaften“:

- Europäische Gemeinschaft für Kohle und Stahl (EGKS, Montanunion)
- → Europäische Wirtschaftsgemeinschaft (EWG);
- Europäische Atomgemeinschaft (EAG, EURATOM)

Der Begriff Europäische Gemeinschaft für die drei Gemeinschaften ist politischer und nicht juristischer Natur, da nur drei Gemeinschaften juristische Kompetenzen besitzen.

#### **Europäische Währungseinheit (ECU):**

Der Haushalt der EG wird in ECU ausgewiesen. ECU ist die Abkürzung von European Currency Unit, zu deutsch Europäische Währungs-einheit. Der ECU ist die neue europäische Recheneinheit des 1979 geschaffenen Europäischen Währungssystems. Er ist noch kein allgemein akzeptiertes Zahlungsmittel,

sondern wird zwischen den Zentralbanken der Mitgliedstaaten und später vielleicht auch im internationalen Kapitalverkehr gehandelt. Private Kapitalanlagen in ECU sind bereits in Italien und Luxemburg möglich. Der ECU ist ein sogenannte Korbwährung. Er setzt sich aus den neun Währungen der Mitgliedstaaten zusammen. Von jeder Währung wird ein Anteil in den Korb gelegt, der dem Wirtschaftsgewicht dieses Landes entspricht. So beeinflusst jede Währung mit ihrem Gewicht den Wert des ECU, der täglich von der EG-Kommission anhand der Notierungen der Notierungen der maßgeblichen nationalen Devisenbörsen festgestellt wird.

#### **Europäische Wirtschaftsgemeinschaft (EWG):**

Die Europäische Wirtschaftsgemeinschaft, die durch den am 25.3.1957 unterzeichneten und am 1.1.1958 in Kraft getretenen EWG-Vertrag gegründet wurde, ist die wichtigste der drei → Europäischen Gemeinschaften. Die Gemeinschaft hat es sich zur Aufgabe gemacht, einen gemeinsamen Markt zu schaffen und die Wirtschaftspolitik der Mitgliedstaaten schrittweise zu harmonisieren. Der EWG-Vertrag sieht unter anderem

- die Schaffung einer Zollunion;
- eine gemeinsame Handelspolitik gegenüber dritten Ländern;
- die Beseitigung von Hemmnissen für den freien Personen-, Güter-, Dienstleistungs- und Kapitalverkehr;
- eine gemeinsame Agrarpolitik;
- eine gemeinsame Verkehrspolitik;
- die Förderung des Wettbewerbs und
- Koordinierung der Wirtschaftspolitik der Mitgliedstaaten vor.

Die Zollunion als Kernstück des Zusammenschlusses wurde vorzeitig am 1.7.1968 realisiert. Die Ergebnisse in den anderen Bereichen sind unterschiedlich; im Einzelfall bleiben sie erheblich hinter den Vertragszielen zurück (z. B. Kapitalverkehr, Verkehrspolitik). Die EG-Kommission hat 1985 eine neue Initiative zur Verwirklichung des gemeinsamen Binnenmarktes bis 1992 gestartet.

#### **Evaluierung:**

Die Überprüfung von Planungen, Projekten und Programmen auf deren voraussichtliche bzw. tatsächliche Wirksamkeit wird Evaluierung genannt (von: Evaluation – Wertbestimmung).

#### **Evapotranspiration:**

Verdunstung von Wasserdampf durch lebende (Transpiration) und unbelebte Oberflächen (Evaporation).

#### **Exzentrizität der Erdbahn:**

Sei a die Länge der großen Halbachse der elliptischen Erdbahn und b die Länge der kleinen Halbachse, so ist die Exzentrizität definiert durch  $(a-b)/a$ .

## FAO → Ernährungs- und Landwirtschaftsorganisation der Vereinten Nationen

### Fauna:

Tierwelt.

### Fernerkundung:

Die Fernerkundung der Erdoberfläche und ihrer Atmosphäre ist die indirekte Herleitung der interessierenden Größen, wie etwa der Meeresoberflächentemperatur oder auch des Bestandes der tropischen Wälder aus Bildern rückgestreuter oder emittierter elektromagnetischer Strahlung. Fernerkundung wird vor allem betrieben mit → Radiometern auf Satelliten, aber auch mit Kameras und Radar-geräten in Flugzeugen.

### Finanzielle Zusammenarbeit (FZ):

Die Finanzielle Zusammenarbeit – auch Kapitalhilfe genannt – umfaßt zinsgünstige langfristige Kredite und seit 1978 Zuschüsse in Form eines nicht rückzahlbaren Finanzierungsbeitrags für → LDC's. Sie steht für Einzelprojekte, zur Förderung von Sektor- und Regionalprogrammen, zur Refinanzierung von Entwicklungsbanken oder ähnlichen Einrichtungen sowie zur Finanzierung der Einfuhr lebenswichtiger ziviler Güter zur Verfügung. Kredite im Rahmen der Finanziellen Zusammenarbeit werden nach einem abgestuften Konditionensystem vergeben.

### Flora:

Pflanzenwelt.

### Forstwirtschaft:

Die Bewirtschaftung von forstlichen Landflächen für die Bereitstellung von Produkten und/oder anderen Leistungen des Waldes.

### Fluorchlorkohlenwasserstoffe (FCKW):

Industriell hergestellte organische Halogen-Verbindungen. Der größte Anwendungsbereich war bis vor wenigen Jahren der Einsatz als Treibmittel in Spraydosen. Mittlerweile werden die FCKW vorwiegend bei der Kunststoffverschäumung, als Löse- und Reinigungsmittel sowie als Kühlmittel verwendet. FCKW sind bei direktem Kontakt unschädlich, in der → Stratosphäre werden sie jedoch durch Sonnenlicht gespalten und verursachen das → Ozonloch über der Antarktis. Desweiteren führen FCKW zu einer Verstärkung des → Treibhauseffektes.

Unterschieden wird zwischen vollhalogenierten und teilhalogenierten FCKW. Vollhalogenierte FCKW bestehen ausschließlich aus Kohlenstoff und > Halogenen und haben sehr hohe → Ozonzerstörungspotentiale. Nicht im → Montrealer Protokoll geregelt ist beispielsweise die vollhalogenierte Verbindung Tetrachlorkohlenstoff (CCl<sub>4</sub>). Teilhalogenierte FCKW enthalten zusätzlich Wasserstoffatome und sind daher chemisch weniger stabil. Teilhalogenierte FCKW wie H-FCKW<sub>22</sub> (CHF<sub>2</sub>Cl) werden als Ersatzstoffe für → vollhalogenierte FCKW diskutiert. Verschiedene teil-

halogenierte FCKW sind jedoch ebenfalls treibhausrelevant und tragen – wenn auch in geringerem Umfang – zur Zerstörung der Ozonschicht bei.

Die Benennung der FCKW erfolgt nach einem internationalen dreistelligen Code (xyz) : x = Zahl der C-Atome minus 1;  
y = Zahl der H-Atome plus 1;  
z = Zahl der F-Atome;  
Cl-Atome werden nicht gezählt.

### Fossile Brennstoffe:

In der erdgeschichtlichen Vergangenheit aus abgestorbenen Pflanzen entstandene feste, flüssige und gasförmige Brennstoffe wie Kohle, Erdöl und Erdgas.

### Fossile Energieträger:

In der erdgeschichtlichen Vergangenheit aus abgestorbenen Pflanzen entstandene feste, flüssige und gasförmige Brennstoffe wie Kohle, Erdöl, Erdgas (→ Primärenergie).

### GATT → Allgemeines Zoll- und Handelsabkommen

### Halogene:

(griech. Salzbildner); Gruppe von Nichtmetallen, die aus den Elementen Fluor (F), Chlor (Cl), Brom (Br), Jod (J) und Astat (At) besteht.

### Halon:

Halone sind bromierte → Fluorchlorkohlenwasserstoffe und haben ein sehr hohes → Ozonzerstörungspotential. Halone werden vorwiegend zu Feuerlöschzwecken eingesetzt. Nur etwa 6 % der Halone werden jedoch zum Löschen eines Feuers verwendet der überwiegende Anteil verbleibt in den Löschgeräten und -anlagen, der Rest gelangt durch Lösch-Training durch Abfüllverluste und durch Fehlauflösungen in die Atmosphäre (→ Montrealer Protokoll).

### Hydrologischer Zyklus:

Wasserkreislauf

### Hygrisch:

Durch Feuchtigkeit bedingt.

### Importpreisindex:

(lat. index = Anzeiger), in einem Wert ausgedrückte Preisentwicklung für eingeführte Güter und Waren, bezogen auf ein Basisjahr, das mit 100 angesetzt ist. Preissteigerungen werden Jahr für Jahr mit dem Basisjahr verglichen.

**in situ:**

vor Ort

**Indigene Gesellschaften (Naturvölker):**

Als „Indigene Gesellschaften“ werden die Eingeborenen in den Tropenwäldern bezeichnet, die in Gruppen (evtl. einzelne Sprachgruppen) oder Stämmen leben und traditionell politisch unabhängig und ökonomisch autark sind (Subsistenzwirtschaft). Sie verfügen über spezifische kulturelle Werte und Riten und leben außerhalb sog. „moderner“ Wirtschafts- und Gesellschaftsformen. Die aus dem kolonialen Sprachgebrauch stammende Bezeichnung „Naturvölker“, die den Begriff „Natur“ mit „primitiv“ und „unkultiviert“ gleichsetzte, erweist sich aus heutiger Sicht als anachronistisch, da die Indigenen kulturschaffend, das heißt Kulturvölker sind.

**Innertropische Konvergenzzone:**

Zone aufsteigender Luftmassen zwischen den Passatwindensystemen der beiden Hemisphären. In dieser Zone treten häufig Schauer und Gewitter auf.

**Inklination der Erdachse:**

Neigung der Rotationsachse der Erde zur Bahzebene um die Sonne.

**Internationale Bank für Wiederaufbau und Entwicklung (International Bank for Reconstruction and Development, IBRD):**

Diese Bank ist eine rechtlich selbständige Sonderorganisation der → Vereinten Nationen, deren Gründung wie die des → IWF in Bretton-Woods beschlossen wurde. Sie nahm am 25. Juni 1946 ihre Geschäftstätigkeit auf. Ziel der IBRD ist es, Wirtschaftswachstum und soziale Entwicklung in den weniger entwickelten Mitgliedsländern zu fördern. Oftmals wird die IBRD als Weltbank bezeichnet. Bei korrekter Verwendung dieser Bezeichnung ist damit neben der IBRD auch die Internationale Entwicklungsorganisation (IDA) gemeint.

**Internationale Entwicklungsorganisation (International Development Association, IDA):**

Die Internationale Entwicklungsorganisation gehört zur → Weltbankgruppe. Sie wurde 1960 gegründet. Sie ist in rechtlicher und finanzieller Hinsicht selbständig gegenüber der IBRD, wird jedoch von deren Personal mitverwaltet. Sie hat die gleiche Zielsetzung wie die IBRD, gewährt ihre Kredite jedoch vor allem an ärmere Länder zu weitaus günstigeren Bedingungen. Die IDA beschafft die Mittel für ihre Kredite nicht auf dem Kapitalmärkten, sondern finanziert sie aus den eingezahlten Beiträgen der Mitgliedsländer und aus Gewinnüberweisungen der IBRD.

**Internationale Regierungsorganisationen (Internationale Governmental Organisations, IGO):**

Organisationen, die durch völkerrechtliche Vereinbarungen von Staaten geschaffen werden und denen die Vertragsparteien Aufgaben auf internationaler Ebene

übertragen haben (z. B. → Umweltprogramm der Vereinten Nationen, → Internationaler Währungsfonds).

**Internationale Tropenholz-Organisation (International Tropical Timber Organisation, ITTO):**

Die ITTO ist das Forum für die Zusammenarbeit von Erzeugern und Verbrauchern auf dem Gebiet der Tropenholzwirtschaft. Ihr gehören gegenwärtig 42 Staaten an, die mehr als 75 Prozent der noch existierenden Tropenwälder und mehr als 95 Prozent des internationalen Tropenholzhandels repräsentieren. Sitz der Organisation ist Yokohama/Japan.

**Internationaler Währungsfonds (International Monetary Fund, IMF):**

Der IMF ist die zentrale Institution der internationalen Währungsordnung. Seine Gründung wurde im Jahre 1944 auf der Währungs- und Finanzkonferenz der → Vereinten Nationen in Bretton Woods beschlossen. 1947 erhielt er den Status einer Sonderorganisation der Vereinten Nationen. Der IMF hat unter anderem die Aufgabe

- ein ausgewogenes Wachstum des Welthandels zu erleichtern,
- die internationale währungspolitische Zusammenarbeit zu fördern,
- geordnete Währungsbeziehungen unter den Mitgliedsländern aufrechtzuerhalten,
- auf innere und äußere Stabilität der Währungen hinzuwirken,
- die Finanzierung und den Abbau von Zahlungsbilanzungleichgewichten zu fördern.

**Internationales Tropenholz-Übereinkommen (International Tropical Timber Agreement, ITTA):**

Das Übereinkommen wurde 1983 in Genf verabschiedet. Es führt Erzeuger- und Verbraucherländer von Tropenholz zusammen. Hauptzwecke des Übereinkommens sind die Förderung des Tropenholzhandels und der Holzverarbeitung in den Erzeugerländern mit begleitenden Maßnahmen zum Tropenwaldschutz und der nachhaltigen Tropenholzerzeugung.

Zur Ausführung und Verwaltung des ITTA wurde in Yokohama/Japan die → Internationale Tropenholz-Organisation gegründet.

**Inversion:**

In der Meteorologie: Umkehrung des vertikalen Temperaturgradienten in der Troposphäre, d. h. Temperaturzunahme mit der Höhe.

**Iteration:**

schrittweises Rechenverfahren zur Annäherung an die exakte Lösung.

**Jahresisotherme:**

Verbindungsline zwischen Orten mit gleicher Jahresdurchschnittstemperatur.

**Joint Venture:**

Bei Joint Ventures handelt es sich um Gemeinschaftsunternehmen von in- und ausländischen Anteilseignern, wobei das inländische Kapital der Entwicklungsländer in der Regel aus staatlichen, das ausländische Kapital der Industrieländer aus privaten Quellen stammt.

Derartige Gemeinschaftsunternehmen mit Beteiligungen in- und ausländischer Partner werden von vielen Entwicklungsländern gegenüber rein ausländischen Direktinvestitionen bevorzugt.

**Karzinom:**

Krebs, Krebsgeschwulst, bösartige epitheliale Geschwulst.

**Katalysator:**

Substanz, die eine chemische Reaktion beeinflusst, ohne selbst dabei verändert zu werden. Chloratome und Chloroxid Radikale wirken bei der Ozonzerstörung in der Stratosphäre als Katalysatoren, d. h. sie sind in der Lage, eine große Anzahl von Ozonmolekülen zu spalten, bevor sie selbst durch eine andere Reaktion verbraucht werden.

**Katarakt:**

Grauer Star, Linsentrübung

**Klima:**

Zustand der Atmosphäre über einem bestimmten Ort charakteristisch für ein großes Zeitintervall von meist mehr als dreißig Jahren.

**Klimamodell:**

Beschreibung des → Klimas in einem mathematischen-physikalischen Computermodell.

**Klimarelevante Spurengase:**

→ Treibhausgase.

**Klimastation:**

Station, an der Klimaparameter wie Temperatur, Niederschlag, Sonnenscheindauer, usw., über lange Zeiträume hinweg gemessen und dokumentiert werden.

**Klimavariation:**

Kurzzeitige Änderung des Klimas.

**Klimax:**

Die Pflanzengesellschaft, die den gegebenen Umweltbedingungen optimal angepaßt ist und sich daher dauerhaft erhält. Die Klimax ist der Endpunkt einer Entwicklung unter gegebenen Bedingungen.

**Kohlendioxid (CO<sub>2</sub>):**

Farbloses, nicht brennbares, schwach säuerliches Gas. CO<sub>2</sub> wird von Pflanzen unter Zuhilfenahme von Wasser und Sonnenenergie zu Kohlenhydraten umgewandelt. Bei der Verbrennung von Pflanzen oder der aus ihnen entstandenen → fossilen Energieträger wird der enthaltene Kohlenstoff wieder als CO<sub>2</sub> freigesetzt. CO<sub>2</sub> ist ein wichtiges → Treibhausgas, seine gegenwärtige Konzentration in der Atmosphäre beträgt 348 ppm.

**Kohlenstoffkreislauf:**

Kreislauf des Kohlenstoffs in seinen verschiedenen chemischen Verbindungen zwischen der Atmosphäre, der Biosphäre, der Hydrosphäre und der → Lithosphäre.

**Kohlenwasserstoffe:**

organische Verbindungen, die aus Kohlenstoff und Wasserstoff bestehen. Kohlenwasserstoffe können durch den Zusatz weiterer Elemente wie z. B. → Halogene in halogenierte Kohlenwasserstoffe verändert werden.

**Komperative Kostenvorteile:**

Adam Smith zeigte 1776, daß bei Vorliegen absoluter Kostenvorteile internationaler Handel die Wohlfahrt der Nationen erhöht. Das von Ricardo 1817 entwickelte Theorem der komperativen Kostenvorteile hingegen besagt, daß der internationale Handel selbst dann (Kosten-) Vorteile für alle beteiligten Länder bringt, wenn ein Land bei der Produktion sämtlicher gehandelter Güter absolute Kostennachteile und das andere dementsprechend absolute Kostenvorteile aufweist. Denn die aufgrund des internationalen Handels stattfindende Spezialisierung bei der Herstellung der insgesamt gehandelten Produkte eröffnet den Handelspartnern die Möglichkeit, die Produktionsfaktoren so einzusetzen, daß weniger Einheiten eines Gutes X für ein Gut Y hergegeben werden müssen, wenn es im Ausland bezogen wird, als wenn dieses im Inland produziert würde. Bedingungen für die Realisierung der Vorteile sind entsprechende Geldflüsse zwischen den Handelspartnern, durch die das Preisniveau bei denjenigen mit höheren Herstellungskosten gesenkt wird.

**Kondensation:**

Übergang von der Dampf- in der Flüssigphase. In der Meteorologie der Übergang des Wasserdampfes der Atmosphäre in den flüssigen Zustand durch Tröpfchenbildung (Woken, Nebel, Tau).



**Kontinentaldrift:**

Relativbewegung der verschiedenen Kontinente der Erde zueinander.

**Kontingente:**

Kontingente sind Wert- oder Mengengrenzen für die Ein- oder Ausfuhr von Waren. Sie können aus außenwirtschaftsrechtlichen Gründen (z. B. kontingentierte Einfuhr) oder aus zollrechtlichen Gründen festgesetzt sein.

Unter kontingentierter Einfuhr versteht man die mengenmäßig begrenzte Einfuhr von Waren.

Die kontingentierte Einfuhr ist von besonderer Bedeutung im internationalen Handel mit Textilgütern, weil die EWG im Rahmen der gemeinsamen Einfuhrregelungen für bestimmte Textilwaren mit Ursprung in Drittländern für die einzelnen Textilwarenkategorien Einfuhrhöchstmengen für die Lieferländer festgesetzt hat.

**Konvektion:**

Vertikaler Austausch von Luftmassen.

**Konzentration von Spurengasen:**

In diesem Bericht wird stets das Volumen → Mischungsverhältnis von Spurengasen – wie üblich in der Physik der Atmosphäre – als Konzentration bezeichnet.

**Latenzzeit:**

Zeitspanne zwischen der Verursachung und der Ausbildung eines Schadens.

**LDC (Less Developed Countries, weniger entwickelte Länder):**

Bezeichnung für Entwicklungsländer im statistischen Apparat der UN-Institutionen.

**LLDC (Least Developed Countries, am wenigsten entwickelte Länder):**

Statistische Kategorie der UN-Institutionen seit 1971, die aus der Gruppe der → LDC's ausgesondert wurde. Maßgebend war

- ein → BIP pro Kopf von weniger als 100 US-Dollar (1971),
- ein Anteil der industriellen Produktion unter 10 Prozent,
- eine Alphabetisierungsquote von weniger als 10 Prozent.

**Litosphäre:**

Äußere Gesteinshülle des Erdkörpers.

**Lomé-Abkommen:**

Das Lomé-Abkommen wurde nach Hauptstadt Togos, in der die Europäische Gemeinschaft und 46 Entwicklungsländer des afrikanischen, karibischen und pazifischen Raums (AKP-Staaten) am 28. Februar 1975 zu-

gunsten dieser Staaten ein umfangreiches Abkommen über wirtschaftliche Zusammenarbeit unterzeichnet haben, benannt. Im Jahre 1980 trat das zweite Abkommen in Kraft, von 1985 bis 1989 galt das Dritte Abkommen (Lomé III). Das Lomé-IV Abkommen, das 1984 von nunmehr 68 Staaten verabschiedet wurde, hat eine Laufzeit von 10 Jahren.

**maligne:**

bösartig

**Meistbegünstigung:**

Die Verpflichtung eines Staates, alle handelspolitischen Vorteile, vor allem Zollvorteile, die er einem Staat eingeräumt hat, auch jedem anderen Staat zu gewähren. Die Meistbegünstigung ist Bestandteil zahlreicher bilateraler Handelsverträge und für alle Mitglieder des → Allgemeine Zoll- und Handelsabkommens verbindlich. Hierdurch sollen die Vertragspartner vor Diskriminierung geschützt werden.

**Melanom:**

außerordentlich bösartiges, gelbe bis schwarzbraune Geschwulst der Haut mit massenhafter Pigmentablagerung, auch schwarzer Krebs genannt.

**Mesosphäre:**

→ Atmosphäre

**Metabolismus:**

Stoffwechsel

**Mineralisation:**

Abbau toter organischer Substanz zu anorganischer Substanz. Vorwiegend von heterotrophen (nicht zur Photosynthese befähigten) Mikroorganismen durchgeführt.

**Mischungsverhältnis:**

In der Atmosphärenforschung hat sich eingebürgert, den Spurenstoffgehalt als Mischungsverhältnis (Molenbruch) anzugeben. Hierbei wird das Volumen-Mischungsverhältnis definiert, als das Verhältnis der Moleküle eines Gases zu der Gesamtzahl aller Moleküle. Folgende Abkürzungen sind gebräuchlich:

- 1 ppm (1 part per million):  $10^{-6}$  (1 Teil auf eine Million)
- 1 ppb (1 part per billion):  $10^{-9}$  (1 Teil auf eine Milliarde)
- 1 ppt (1 part per trillion):  $10^{-12}$  (1 Teil auf eine Billion).

**Modelle:**

Eindimensionales (1-D) Modell – mit diesem Modell läßt sich die Gesamtsäulendichte und die Vertikalverteilung eines Spurenstoffes berechnen.

Zweidimensionales (2-D) Modell – neben der vertikalen Höhe wird hier die geographische Breite als weitere Dimension benutzt, um der breitenabhängigen Solarstrahlung Rechnung zu tragen. Dreidimen-

sionales (3-D) Modell – hier wird zusätzlich die geographische Länge eingezeichnet; 3-D Modelle befinden sich im Hinblick auf chemische Fragestellungen erst im Entwicklungsstadium.

#### **Monsune:**

Jahreszeitlich wechselnde Wind- und Niederschlagsysteme; besonders in den Tropen und Subtropen.

#### **Montrealer Protokoll:**

Das Montrealer Protokoll vom 16. September 1987 über Stoffe, die zu einem Abbau der → Ozonschicht führen, ist am 1. Januar 1989 in Kraft getreten. Das Montrealer Protokoll ist die erste Folgevereinbarung zum → Wiener Übereinkommen und bildet einen wichtigen Grundstein in der Umweltpolitik. In dem Protokoll werden die Produktion und der Verbrauch der wichtigsten vollhalogenierten → FCKW und bestimmter → Halone geregelt.

Auf der 2. Vertragsstaatenkonferenz zum Montrealer Protokoll im Juni 1990 in London, wurde eine Verschärfung der Protokollregelungen beschlossen (vgl. Abschnitt D, 5. Kap., Nr. 1.1.3).

#### **Moratorium:**

Zwischen Gläubigern und Schuldern vereinbarte Stundung der Zahlungen aus Schuldverhältnissen, auch beschränkt auf bestimmte Typen von Verbindlichkeiten (Lieferantenkredite, Bankdarlehen, Anleihen, Regierungenkredite).

#### **Multilaterale Investitionsgarantie-Agentur:**

Die MIGA wurde 1985 gegründet. Ihre Aufgabe besteht in der Förderung von Auslandsinvestitionen in den Entwicklungsländern; sie übernimmt Garantien für sogenannte nicht-kommerzielle (also im wesentlichen politische) Risiken.

#### **Multilaterale Zusammenarbeit:**

Die multilaterale Zusammenarbeit – auch multilaterale Hilfe genannt – findet im Rahmen von → Projekten und Programmen → Inter-nationaler Regierungsorganisationen zugunsten der → Entwicklungsländer statt. Die Finanzierung erfolgt durch Beiträge von Mitgliedsstaaten. Ihre Vertreter in den Aufsichtsorganen wirken bei der Vergabepolitik der Organisation mit. Leistungen der multilateralen Zusammenarbeit erbringt die Bundesrepublik Deutschland auch über die → Europäische Gemeinschaft (zum Beispiel → Lomé-Abkommen, Nahrungsmittelhilfe).

#### **Nachhaltigkeit:**

Begriff aus der Land- und Forstwirtschaft, der eine Wirtschaftsweise bezeichnet, die sicherstellt, daß die Produktionsleistung des Ökosystems für kommende Generationen unvermindert erhalten bleibt. Der Begriff wird nicht einheitlich verwendet und teilweise im Sinne der Erhaltung der Waldfläche, des Holzertes, der betrieblichen Wertschöpfung oder des ökologischen Gleichgewichts verstanden.

#### **Netto-Primärproduktion:**

Nettofluß von Kohlenstoff aus der Atmosphäre in die grünen Pflanzen. Er besteht aus dem Bruttofluß von Kohlenstoff in die grünen Pflanzen, der durch die → Photosynthese in den Pflanzen fixiert wird, und der Beatmung von CO<sub>2</sub> durch die Pflanze.

#### **Netto-Ressourcentransfer:**

Der Ausdruck bezeichnet die Differenz aus Neukrediten und → Schuldendienst. Er ist gegenwärtig in das Zentrum der öffentlichen Diskussion über die Verschuldung der Entwicklungsländer gerückt, weil der jährlich zu leistende Schuldendienst für die im Zuge vieler Jahre aufgelaufenen Verbindlichkeiten in vielen Entwicklungsländern höher ist als die im gleichen Zeitraum empfangenen Neukredite. Ein sich so ergebender negativer Ressourcentransfer bedeutet jedoch nicht, daß es tatsächlich zu einem Mittelabfluß aus diesem Land kommt. Entscheidend dafür ist vielmehr die Zahlungsbilanzsituation des betreffenden Landes.

#### **Neue Weltwirtschaftsordnung:**

Die Entwicklungsländer wollen ihre Position in der Weltwirtschaft durch solidarisches Auftreten gegenüber den Industrieländern verbessern. Diese Haltung festigt sich auf verschiedenen internationalen Konferenzen. Weil sich die Entwicklungsländer durch die gegenwärtige Wirtschaftsordnung benachteiligt sehen, fordern sie eine Neue Weltwirtschaftsordnung, deren Akzente unter anderem sind:

- Volle Souveränität über ihre nationalen Wirtschaften;
- Rohstoffabkommen zur Stabilisierung der Märkte und der Erlöse für ihre Exportprodukte;
- Produzentenkartelle;
- sehr viel stärkere Öffnung der Märkte der Industrieländer für Halb- und Fertigwaren aus Entwicklungsländern;
- Erhöhung des Anteils der Entwicklungsländer an der Weltindustrieproduktion von jetzt rund 11 Prozent auf 25 Prozent im Jahr 2000.

#### **Nicht-Regierungsorganisationen (Non Governmental Organisations, NGO):**

Sammelbegriff für nicht staatliche Organisationen, der allerdings zumeist in bezug auf Gruppierungen der neuen sozialen Bewegungen (Ökologiebewegung, Friedensbewegung u. a.) verwendet wird.

#### **Nichttarifäre Handelshemmnisse:**

Besondere Form von Handelsbeschränkungen. Die Palette der Nichttarifären Handelshemmnisse reicht von einseitigen mengenmäßigen Beschränkungen über → Selbstbeschränkungsabkommen, Subventionen, abweichende Normen und technische Vorschriften sowie eine diskriminierende öffentliche Auftragsvergabe bis zu zeitraubenden Einfuhrformalitäten.

**Nord-Süd-Dialog:**

Begriff für alle Bemühungen, um zwischen der Nord- und der Südhalbkugel, d. h. zwischen Industrie- und Entwicklungsländern, zu einem Interessenausgleich zu kommen.

**Nukleinsäuren:**

Hochmolekulare Stoffe, die in jeder Zelle vorkommen. Sie liegen vor als DNA (Desoxiribonukleinsäure) oder RNA (Ribonukleinsäure) und spielen bei der Übertragung der Erbinformation eine entscheidende Rolle.

**Nutzenergie:**

Unter Nutzenergie versteht man die Energie, die vom Verbraucher tatsächlich genutzt wird, d. h. nach Abzug der Umwandlungsverluste beim Einsatz der → Endenergie. Nutzenergie ist z. B. Wärme, Licht, Kraft, Nutzelektrizität. Die tatsächlich genutzte Energie (Nutzenergie) liegt z. Z. in der Bundesrepublik Deutschland bei 45 % der Endenergie und bei rund  $\frac{1}{3}$  der eingesetzten → Primärenergiemenge.

**Nutzholz:**

Holz für alle Verwendungszwecke (z. B. Bauholz, Möbelholz, Papierherstellung) außer zur Energiegewinnung (Brennholz).

**Ökosystem:**

Die Einheit von Lebensgemeinschaft (Biozönose) und ihren Lebensraum (Biotop).

**OPEC-Staaten:**

Die OPEC (Organization of Petroleum Exporting Countries) wurde 1960 gegründet. Sie ist ein Zusammenschluß von dreizehn Erdölausfuhrländern Asiens, Afrikas und Lateinamerikas. Die Finanzsituation und damit die Entwicklungsmöglichkeiten der OPEC-Länder haben sich seit der starken Steigerung der Erdölpreise 1973 grundlegend verbessert.

**Organisation der Vereinten Nationen für Erziehung, Wissenschaft und Kultur (United Nations Educational, Scientific and Cultural Organisation, UNESCO):**

Die UNESCO wurde am 4. November 1946 gegründet, als 20 Staaten ihre Beitrittsurkunden bei der Regierung Großbritanniens hinterlegt hatten.

Die UNESCO soll durch die Förderung der Zusammenarbeit zwischen den Nationen auf den Gebieten der Erziehung, der Wissenschaft, der Kultur und des Kommunikationswesens einen Beitrag zum Frieden und zur allgemeinen Sicherheit leisten, um so die Achtung vor Gerechtigkeit, Gesetzen, Menschenrechten und Grundfreiheiten zu verbreiten, die die Charta der Vereinten Nationen allen Menschen der Welt ohne Unterschiede nach Rasse, Geschlecht, Sprache oder Religion gewährleistet.

Zur Verwirklichung ihrer Ziele verfolgt die UNESCO zwei parallele und einander ergänzende Aufgaben: die internationale intellektuelle Zusammenarbeit in ihren Zuständigkeitsbereichen und Entwicklungs-

vorhaben auf sozialem, kulturellen und wirtschaftlichem Gebiete. Sitz des UNESCO-Sekretariats ist Paris, Frankreich.

**Ozon:**

(griech. das Riechende) aus drei Sauerstoffatomen bestehendes Molekül; chemisches Zeichen: O<sub>3</sub>.

Die Hauptmenge des atmosphärischen Ozons befindet sich in der Stratosphäre zwischen 12 und 40 km und wird hier durch photolytische Spaltung von Sauerstoff (O<sub>2</sub>) gebildet. Die Ozonmenge in der Troposphäre repräsentiert etwa  $\frac{1}{10}$  der Ozongesamtsäule. Die Hauptquelle ist hier die photochemische Bildung durch → Kohlenwasserstoffe und → Stickoxide aufgrund der „Smog-Mechanismen“.

Während Ozon in der Troposphäre stark negative Auswirkungen hat (giftig für Menschen, Tiere und Pflanzen; Verstärkung des Treibhauseffektes), wirkt das Ozon in der Stratosphäre als lebensnotwendiger UV-B-Filter (→ Ozonloch, Ozonschicht).

**Ozonloch:**

1985 wurde entdeckt, daß seit 1977 über der Antarktis während der Monate September und Oktober drastische Abnahmen der Ozonkonzentration stattfinden. Mittlerweile steht fest, daß das jährlich wiederkehrende Ozonloch durch industriell hergestellte → Fluorchlorkohlenwasserstoffe verursacht wird.

**Ozonschicht:**

Schicht in der → Stratosphäre, in der der größte Teil des atmosphärischen Ozon enthalten ist. Sie liegt etwa zwischen 15 und 30 km Höhe.

In der Ozonschicht wird die energiereiche UV-B-Strahlung absorbiert und in Wärme umgewandelt. Verringerungen der Ozongesamtsäulendichte haben Intensitätszunahmen der zellschädigenden UV-B-Strahlung am Erdboden zur Folge. Des weiteren kann die Änderung der Ozonschicht zu einer Beeinflussung des → Klimas führen. Durch industriell hergestellte → Fluorchlorkohlenwasserstoffe (FCKW) wird die Ozonschicht in zunehmendem Maße zerstört.

**Ozonzerstörungspotential:**

Maß für die relative Ozonwirksamkeit chlor- und bromhaltiger Verbindungen (im Englischen: Ozone Depleting Potential, ODP). FCKW 11 ist dabei als Bezugsgröße gewählt und mit dem Wert 1 festgesetzt.

**Paläoklimatologie:**

Klimatologie in erdgeschichtlichen Zeiten.

**pH-Wert:**

Logarithmisches Maß für den Säuregehalt bzw. den Wasserstoff (H<sup>+</sup>)-Ionen-Gehalt einer Flüssigkeit bzw. Lösung. Je niedriger der pH-Wert ist, umso größer ist die Konzentration von H<sup>+</sup>-Ionen oder umso saurer ist eine Lösung. Beträgt der pH-Wert 7, so ist eine Lösung chemisch neutral, ist er geringer, so ist sie sauer, ist er höher, so ist sie basisch, bei pH = 6 ist die Konzentra-

tion von H<sup>+</sup>-Ionen zehnmal höher als bei pH = 7 usw.

#### **Photodissoziation:**

Prozeß, bei dem ein Molekül ein Photon (Energiequant der elektromagnetischen Strahlung) absorbiert und dadurch gespalten wird.

#### **Photon:**

(auch Lichtquant, Strahlungsquant), Energiequant der elektromagnetischen Strahlung, also z. B. von Licht oder Röntgenstrahlung.

#### **Photooxidantien:**

Gase in der Atmosphäre, die sich vorwiegend aus Kohlenmonoxid, den Kohlenwasserstoffen und den Stickoxiden durch photochemische Reaktionen, also unter Einwirkung von UV-Strahlung, bilden. Eine sehr wichtige Photooxidantie ist das Ozon in der Troposphäre. Es wirkt toxisch auf Menschen, Tiere und Pflanzen.

#### **Photosynthese:**

Der Aufbau von Kohlehydraten durch grüne Pflanzen aus Kohlendioxid und Wasser mit Hilfe des Sonnenlichts. Die Photosynthese ist ein sehr wichtiger chemischer Vorgang der Erde, der direkt in autotrophen Pflanzen das Leben ermöglicht und indirekt über die Nahrungskette den heterotrophen Organismen zugeht.

#### **Plankton:**

Lebensgemeinschaft im freien Wasser schwebender Organismen mit fehlender oder geringer Eigenbewegung. Zooplankton: planktische Tiere, Phytoplankton: planktische Pflanzen.

#### **Polnarnacht:**

die Zeit, in der die Sonne länger als 24 Stunden unter dem Horizont bleibt, zutreffend für Orte zwischen den Polen und den Polarkreisen. die Dauer der Polarnacht wächst mit geographischer Breite und beträgt im Bereich der Pole nahezu ein halbes Jahr.

#### **Polyurethan:**

Abkürzung „PUR“, Kunststoff, der zu verschiedenen Arten handelsüblicher Schaumstoffe – starre und elastische Schaumstoffe – verarbeitet wird. Zur Kunststoffverschäumung werden derzeit noch in großem Umfang → Fluorchlorkohlenwasserstoffe eingesetzt.

#### **Präkanzerose:**

Vorkrebskrankheit, die zu Krebs führt oder führen kann.

#### **Präzession:**

Kreiselförmige Drehbewegung der Erdachse um ihre Figurenachse, hervorgerufen durch die Schwerkraft von Sonne und Mond. Eine Drehbewegung dauert etwa 20 000 Jahre.

#### **Primärenergie:**

Unter Primärenergie versteht man die Rohstoffe zur Energiegewinnung, d. h. Primärenergieträger sind alle Energieträger, die natürlich vorkommen, z. B. die → fossilen Brennstoffe Steinkohle, Braunkohle, Erdöl, Erdgas, Ölschiefer, Teersande oder die Kernbrennstoffe Uran, Torium oder die → erneuerbaren Energiequellen, z. B. Wasserkraft, Windkraft, Sonne, Erdwärme, Biomasse.

#### **Primärwald:**

Urwald; im strengsten Sinne ein autochtoner Waldbestand, dessen Entwicklung nicht oder nur so wenig vom Menschen beeinflusst wurde, daß seine Physiognomie von der natürlichen Umwelt geformt und bestimmt wird.

#### **Projekt:**

Ein Projekt ist eine funktional, räumlich, wirtschaftlich und zeitlich abgrenzbare Maßnahme mit zielorientierter Aufgabenstellung.

Die deutsche Förderung eines Projektes reicht zum Beispiel von den kurzzeitigen Entsendung eines Beraters oder Gutachters über Fortbildungsmaßnahmen bis zur Finanzierung eines viele Millionen Deutsche Mark umfassenden Projektes der Infrastruktur.

#### **Protektionismus:**

Bezeichnung für eine Außenhandelspolitik, die auf den Schutz der gesamten Volkswirtschaft, einzelner Branchen oder bestimmter inländischer Produzenten gegenüber den ausländischen Wettbewerbern gerichtet ist. Diesem Ziel dienen → Zölle, mengenmäßige Einfuhrbeschränkungen und in den letzten Jahren in zunehmendem Ausmaß → Nichttarifäre Handelshemmnisse. Weitere Spielarten des Protektionismus sind nationale Kaufparolen, → Selbstbeschränkungsabkommen sowie Wettbewerbsverzerrungen durch Subventionen. Grundsätzlich führt er zu einer Verfälschung der internationalen Arbeitsteilung. Der Gegensatz des Protektionismus ist der Freihandel.

#### **Psoriasis:**

Schuppenflechte, Hauterkrankung mit weißlicher schorfartiger Schuppenbildung.

#### **Quasi-biennial-oscillation:**

Abk. QBO, dt. = quasi-zweijährige Schwankungen; die etwa 26monatige Welle des → zonalen Windes in der Stratosphäre.

#### **Quellgas:**

Gas, das in der → Troposphäre sehr reaktionsträge ist und erst nach Einwirkung kurzweiliger Sonnenstrahlung in der → Stratosphäre aufgespalten wird und chemisch reagiert (z. B. FCKW, N<sub>2</sub>O).

**Radikal:**

Molekül oder Atom, das ein ungepaartes Elektron besitzt und daher sehr reaktionsfreudig ist (z. B. OH, NO). Radikale haben für die Chemie der Atmosphäre sehr große Bedeutung.

**Radiometer:**

Meßinstrument der Satelliten, das die Strahldichte von der Erde und der Atmosphäre mißt, die als Rohdaten der Satelliten fungieren. Die Radiometer messen die Strahlung vom Satelliten aus in verschiedenen Spektralbereichen, z. B. im nahen Infrarot. Sie messen die Strahldichten der Reihe nach auf allen Gitterpunkten der Erde. Aus den Daten der Strahldichte werden später die gewünschten Informationen wie Charakter der Wolken oder der Wolkenbedeckungsgrad oder auch die Art der Landnutzung gewonnen.

**Rauhigkeit:**

Maß für den Widerstand, den die Erdoberfläche der Luftströmung entgegensetzt.

**Recycling:**

Rückgewinnung von Rohstoffen aus Abfällen.

**Regionale Entwicklungsbanken:**

Im Gegensatz zur → Weltbank sind die regionalen Entwicklungsbanken auf die Finanzierung von Projekten ihrer regionalen Mitgliedsländer festgelegt.

Hierzu gehören u. a. die Asiatische Entwicklungsbank (Asian Development Bank, AsDB) mit Sitz in Manila, die afrikanische Entwicklungsbank (African Development Bank, AfDB) mit Sitz in Abidjan, sowie die Interamerikanische Entwicklungsbank (Banco Interamericano de Desarrollo, BID) mit Sitz in Washington.

**Ressourcen:**

Ressourcen sind einer weiten Begriffsdefinition folgend alle Bestände der Produktionsfaktoren Arbeit, Boden und Kapital, die bei der Produktion von Gütern eingesetzt werden können. Im engeren Sinn werden unter Ressourcen Rohstoffe und Energieträger verstanden, wobei zwischen (bedingt) regenerierbaren und nicht regenerierbaren Ressourcen unterschieden wird. Dem Bericht liegt die engere Begriffsbildung zugrunde.

**Rohstoffabkommen:**

Rohstoffabkommen sind Verträge zwischen rohstoffproduzierenden und rohstoffverbrauchenden Ländern, die den Erzeugerländern – zumeist durch Interventionspreise, Ausgleichslager und Exportquoten – stabile Ausfuhrerlöse und den Verbraucherländern eine störungsfreie Rohstoffversorgung zu angemessenen Preisen sichern sollen.

**Saurer Niederschlag:**

Übersäuerung des Regens und Nebels vor allem durch Schwefelsäure (H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>) und Salpetersäure (HNO<sub>3</sub>). H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> und HNO<sub>3</sub> werden in der Atmosphäre aus den Schadstoffen Schwefeldioxid (SO<sub>2</sub>) und Stick-

oxid (NO<sub>x</sub>) gebildet. Saurer Niederschlag hat gegenüber dem natürlichen Regenwasser einen um das zehn bis zwanzigfache und gegenüber natürlichem Nebelwasser einen hundertfach erhöhten Säuregrad.

**Savanne:**

Vegetationsform der semiariden (halbtrockenen) Tropen, bei der Grasfluren von einzelnen Bäumen oder Bauminsel durchsetzt sind. Mit zunehmender Feuchte nehmen Gehölzgruppen einen größeren Raum ein.

**Schwefeldioxid (SO<sub>2</sub>):**

Farbloses, stechend riechendes Schadgas, das überwiegend bei der Verbrennung schwefelhaltiger Energieträger (Kohle, Erdöl) und in geringerem Umfang bei industriellen Prozessen entsteht (→ Saurer Niederschlag).

**Schwellenländer:**

Entwicklungsländer mit einem verhältnismäßig fortgeschrittenen Entwicklungsstand werden als Schwellenländer bezeichnet. Ihre steigende Wirtschaftskraft wird es ihnen voraussichtlich erlauben, die Strukturmerkmale eines typischen Entwicklungslandes mehr und mehr zu überwinden. Unter Berücksichtigung anderer Kriterien (zum Beispiel Anteil der industriellen Erzeugung am → Bruttoinlandsprodukt, Grad der Alphabetisierung, Lebenserwartung) wird bei der Beurteilung eines Entwicklungslandes als „Schwellenland“ von der Höhe des → Pro-Kopf-Einkommens ausgegangen. Typisch für viele dieser Länder ist es, daß ihre gesellschaftliche und soziale Entwicklung mit der wirtschaftlichen nicht Schritt gehalten hat. Auf der internationalen Ebene gibt es keine verbindliche Liste von Schwellenländern. Das → BMZ betrachtet etwa 30 Staaten als Schwellenländer, beispielsweise Brasilien, Ecuador, Jamaica, Korea, Mexiko und Singapur.

**Schwellenwert:**

Bezeichnet den Umschlagpunkt auf der Dosis-Wirkungskurve, z. B. den Punkt, an dem die im Organismus vorhandenen Abwehrkräfte nicht mehr ausreichen, um eine Schädigung abzuwehren und somit eine Schädigung des Organismus eintritt.

**Sekundärenergie:**

Sekundärenergieträger sind alle Energieträger, die als Ergebnis eines Umwandlungsprozesses (z. B. in Raffinerien oder Kraftwerken) aus → Primärenergieträgern entstehen, z. B.: die Kohleprodukte Koks und Briketts, die Mineralölprodukte Benzin und Heizöl, die Gasprodukte Stadtgas und Raffineriegas sowie elektrischer Strom und Fernwärme.

**Sekundärwald:**

Natürlicher Folgebestand von Bäumen nach Beseitigung des primären oder sekundären Ursprungsbestandes durch den Menschen oder Nachwuchs, der sich nach natürlichen Katastrophen (Feuer, Insekten) einstellt.

**Solarkonstante:**

1373 Watt pro m<sup>2</sup>. Dies ist die Strahlungsflußdichte (Strahlungsenergie pro Zeit- und Flächeneinheit) der Sonne, die im mittleren Abstand zwischen Sonne und Erde (150 Mio. km) auf einer Einheitsfläche senkrecht zur Strahlrichtung der Sonne vom Außenrand der Atmosphäre empfangen wird.

**Sonnenfleckenzyklus:**

Periode von im Durchschnitt 11 Jahren, in der die Anzahl der Sonnenflecken (Gebiete mit einer im Vergleich zur Sonnenoberfläche geringeren Oberflächentemperatur) auf der Oberfläche der Sonne einen Zyklus durchlaufen.

**Southern Oscillation:**

Luftdruckschwankung zwischen dem südpazifischen Subtropenhoch und dem indonesischen Hitzetief, die mit dem → El Nino-Ereignis und weltweiten Klimanomalien verbunden ist.

**Stadteffekt:**

Einfluß der Stadt auf die Klimaparameter, insbesondere die gegenüber der Umgebung höhere klimatologische Durchschnittstemperatur in einer Stadt.

**Stickoxide:**

NO<sub>x</sub> wird fast ausschließlich in Form von NO an die Atmosphäre abgegeben. Da sich sehr schnell ein photochemisches Gleichgewicht zwischen NO und NO<sub>2</sub> einstellt, spricht man im allgemeinen von NO<sub>x</sub> als der Summe von NO und NO<sub>2</sub>. NO<sub>x</sub> entsteht bei Verbrennungsprozessen mit hohen Temperaturen – vor allem durch Kraftfahrzeuge und Kraftwerke (→ Saurer Niederschlag, → Ozon).

**Stöchiometrie:**

Lehre von der mengenmäßigen Zusammensetzung dynamischer Verbindungen und der mathematischen Berechnung chemischer Umsetzungen.

**Stomata:**

Spaltöffnungen an den Blättern von Pflanzen.

**Strahlstrom:**

(syn.: Jetstream), Windsystem in der oberen Troposphäre mit sehr hohen Windgeschwindigkeiten (durchschnittliche Windstärke mehr als 60 Knoten).

**Stratosphäre:**

→ Atmosphäre.

**Stratopause:**

→ Atmosphäre

**Sublimation:**

Der direkte Übergang eines Stoffes vom festen Aggregatzustand in den gasförmigen (oder umgekehrt). Speziell in der Meteorologie der direkte Übergang von der Dampf- in die Eisphase.

**Sukzession:**

Durch äußere Einflüsse verursachte Übergehen einer Pflanzengesellschaft in eine andere am gleichen Standort.

**Szenario:**

Ermittlung eines möglichen Zustandes unter der Annahme bestimmter Bedingungen. Die Ergebnisse sind unabhängig von den Randbedingungen der Szenarien und unterscheiden sich daher von Prognosen.

**Technische Zusammenarbeit (TZ):**

Die Technische Zusammenarbeit – auch Technische Hilfe genannt – zielt auf die Steigerung des Leistungsvermögens von Menschen und Institutionen in den Entwicklungsländern ab. Im einzelnen geht es dabei um die Entsendung von Fachkräften, die Bereitstellung von Zuschüssen, Material und Ausbildungsmöglichkeiten. Diese Leistungen werden in der Regel unentgeltlich gewährt. Das Entwicklungsland übernimmt dabei aber meist die im Land selbst anfallenden laufenden Kosten.

**Teilhalogenierte FCKW:**

Fluorchlorkohlenwasserstoff

**Terrestrisch:**

land-; an Land vorkommend

**Terms of Trade:**

Dieser Begriff bezeichnet das Verhältnis des → Index der Ausfuhrpreise zum → Index der Einfuhrpreise jeweils in der Währung des betreffenden Landes ausgedrückt. Steigen die Ausfuhrpreise bei konstanten oder sinkenden Einfuhrpreisen oder sinken die Einfuhrpreise bei konstanten Ausfuhrpreisen, verbessern sich die Terms of Trade, weil für die gleiche Exportgütermenge mehr Importgüter eingeführt werden können.

**Thermosphäre:**

→ Atmosphäre

**Transpiration:**

Verdunstung von Wasser aus den Spaltöffnungen der Pflanzen.

**Treibhauseffekt:**

Der Treibhauseffekt wird von Gasen in der Atmosphäre hervorgerufen, die die kurzwellige Sonnenstrahlung nahezu ungehindert durch die Atmosphäre zur Erdoberfläche passieren lassen, die langwellige Wärmestrahlung der Erdoberfläche und der Atmosphäre hingegen stark absorbieren. Aufgrund der wärmeisolierenden Wirkung dieser Spurengase ist die Temperatur in Bodennähe etwa 30 °C höher als die Strahlungstemperatur des Systems Erde-Atmosphäre ohne diese Gase (natürlicher Treibhauseffekt). Wegen des Anstiegs menschlich bedingter Spurengase wird mit einer Verstärkung des Treibhauseffektes, die mit → zusätzlicher Treibhauseffekt bezeichnet wird, und einer Temperaturerhöhung gerechnet.

**Treibhausgas:**

Gas in der Atmosphäre, das am → Treibhauseffekt beteiligt ist (Wasserdampf, CO<sub>2</sub>, N<sub>2</sub>O, CH<sub>4</sub>, O<sub>3</sub>, FCKW).

**Tropen:**

Gebiete, die sich durch ein Tageszeitenklima auszeichnen. Hier sind die Temperaturschwankungen zwischen Tag und Nacht größer als die zwischen Sommer und Winter bzw. zwischen Regen- und Trockenzeit.

**Tropopause:**

→ Atmosphäre

**Troposphäre:**

→ Atmosphäre.

**Ultraviolettstrahlung:**

Abkürzung „UV“; Elektromagnetische Energie mit höheren Frequenzen bzw. kürzeren Wellenlängen (unter 400 nm) als sichtbares Licht; die UV-Strahlung unterteilt sich in drei Bereiche: UV-A (320 – 400 nm), UV-B (280 – 320 nm) und UV-C (40 – 290 nm).

**UNCTAD → Welthandels- und Entwicklungskonferenz der Vereinten Nationen****UNDP → Entwicklungsprogramm der Vereinten Nationen****Vereinte Nationen (United Nations, UN):**

Die Weltorganisation, die am 26.6.1945 geschaffen wurde, hat die Aufgabe, den internationalen Frieden und die Weltsicherheit zu fördern, zur Entwicklung freundschaftlicher Beziehungen zwischen den Nationen beizutragen und durch internationale Zusammenarbeit Probleme wirtschaftlicher, sozialer, kultureller und humanitärer Art zu lösen. Die Organisation

gründet ihre Arbeit auf die Achtung der Gleichberechtigung und des Selbstbestimmungsrechtes der Völker sowie der Menschenrechte und Grundfreiheiten für jedermann ohne Unterschied von Rasse, Geschlecht, Sprache und Religion. Organe sind die Generalversammlung, die regelmäßig einmal jährlich zusammentritt; der Sicherheitsrat (15 Mitglieder, davon 5 Ständige Mitglieder mit Vetorecht); der Wirtschafts- und Sozialrat (ECOSOC), dem unter anderem die regionalen Wirtschaftskommissionen unterstellt sind; der Treuhandrat für die der Organisation unterstehenden Treuhandgebiete; der Internationale Gerichtshof (15 Mitglieder; Sitz: den Haag); und das Generalsekretariat (Sitz: New York). Die Organisation unterhält zahlreiche Spezialinstitutionen und (autonome) Sonderorganisationen gehören den Vollmitglieder an.

**Verweilzeit:**

Mittlere Lebenszeit eines Gases in der Atmosphäre.

**Vollhalogenierte FCKW:**

→ Fluorchlorkohlenwasserstoff

**Wanderfeldbau:**

Form der Landwirtschaft, bei der in bestimmten Zeitabständen ein neues Stück Wald gerodet wird, um landwirtschaftliche Nutzpflanzen anzupflanzen. Dies ist erforderlich, da die Böden der neugewonnenen Nutzfläche sehr schnell verarmen und dann keine Frucht mehr tragen können. Diese Art der Landwirtschaft wird in den tropischen Wäldern häufig praktiziert. Dabei wachsen nach der landwirtschaftlichen Nutzung auf den Feldern allgemein wieder Wälder nach, die nach mehreren Jahrzehnten erneut gerodet werden, um hier erneut landwirtschaftliche Nutzpflanzen anzupflanzen.

**Warmzeit:**

Zeitspannen der Klimageschichte der Erde, in der die mittlere Oberflächentemperatur auf der Erde relativ hoch war.

**Weltbank → Internationale Bank für Wiederaufbau und Entwicklung (IBRD)****Weltbankgruppe:**

Die Weltbankgruppe umfaßt im wesentlichen die folgenden Organisationen:

- die Internationale Bank für Wiederaufbau und Entwicklung (International Bank for Reconstruction and Development, IBRD) – oftmals auch nur Weltbank genannt –;
- die Internationale Entwicklungsorganisation (Internationale Development Association, IDA) und
- die Internationale Finanzkooperation (International Finance Cooperation, IFC).

**Weltgesundheitsorganisation (World Health Organization, WHO):**

Die Gründung der Weltgesundheitsorganisation wurde am 22. Juli 1946 von der Internationalen Gesundheitskonferenz beschlossen, die der Wirtschafts- und Sozialrat nach New York einberufen hatte. Die Organisation nahm am 7. April 1948 ihre Arbeit auf, nachdem 26 Mitglieder der Vereinten Nationen ihre Verfassung ratifiziert hatten. Aufgabe der WHO ist es, den Gesundheitsstand aller Völker auf das höchstmögliche Niveau zu bringen. Zu diesem Zweck unterhält die WHO weltweite Einrichtungen zur Förderung der Gesundheit, sie arbeitet mit den Mitgliedstaaten auf dem Gesundheitssektor zusammen und koordiniert die biomedizinische Forschung. Sitz der WHO ist Genf, Schweiz.

**Welthandels- und Entwicklungskonferenz der Vereinten Nationen (United Nations Conference on Trade and Development, UNCTAD):**

Die Welthandels- und Entwicklungskonferenz der Vereinten Nationen (UNCTAD) wurde im Dezember 1964 als Organ der Generalversammlung der Vereinten Nationen mit dem Ziel errichtet, Handel und damit verknüpfte Entwicklungsaufgaben auf weltweiter Ebene und unter Beachtung anderer internationaler Organisationen zu fördern. Der UNCTAD gehören mittlerweile 168 Mitglieder an. Sie hat ein ständiges Sekretariat als Verwaltungsorgan mit Sitz in Genf, dem ein Generalsekretär vorsteht. Die UNCTAD-Konferenzen spielen eine zentrale Rolle im Nord-Süd-Dialog. Mit der Gründung der UNCTAD verbanden die Entwicklungsländer die Hoffnung, ein Forum zu schaffen, in dem ihre wirtschaftlichen Interessen stärkere Berücksichtigung finden konnten als im GATT. In der UNCTAD verfügen die Entwicklungsländer über eine Stimmenmehrheit. Die politische Bedeutung dieser Organisation wird jedoch dadurch eingeschränkt, daß ihre Resolutionen lediglich empfehlenden Charakter haben. Dennoch waren die bisherigen UNCTAD-Konferenzen wichtige Foren für die Beziehungen zwischen Industrieländern und Entwicklungsländern.

**Weltorganisation für Meteorologie (World Meteorological Organization, WMO):**

Die Konvention zur Gründung der WMO wurde 1947 auf der Zwölften Konferenz der Direktoren der Internationalen Organisation für Meteorologie in Washington angenommen und trat am 23. März 1950 in Kraft.

Die WMO soll

- die internationale Zusammenarbeit bei der Schaffung eines Netzes von meteorologischen Beobachtungsstationen und Wetterdienstzentren erleichtern;
- die Entwicklung von Systemen fördern, die einen raschen Austausch von Wettermeldungen ermöglichen;
- die Standardisierung meteorologischer Beobachtungsmethoden fördern und die Vereinheitlichung

der Veröffentlichungen von Beobachtungen und Statistiken sicherstellen;

- für die vermehrte Anwendung der meteorologischen Kenntnisse bei der Luftfahrt, Schifffahrt, in der Landwirtschaft und auf anderen Gebieten sorgen;
- Anregungen zur Forschung und Ausbildung auf dem Gebiet der Meteorologie geben und Hilfe bei der Koordinierung der internationalen Aspekte solcher Programme leisten.

**Tritium:**

überschwerer Wasserstoff (T); radioaktives Isotop des Wasserstoffs mit einem Proton und zwei Neutronen im Kern.

**Wiederaufforstung:**

→ Aufforstungen auf Flächen, die bereits bewaldet waren.

**Wiener Übereinkommen:**

Das Wiener Übereinkommen vom 22. März 1985 zum Schutz der Ozonschicht ist im August 1988 in Kraft getreten. Als Rahmenabkommen enthält das Übereinkommen keine konkreten Maßnahmen (→ Montrealer Protokoll).

**Wolkenbedeckungsgrad:**

Anteil des Himmels, der aus der Sicht eines Beobachters auf der Erdoberfläche mit Wolken bedeckt ist. Dabei wird vorausgesetzt, daß die Sicht nicht durch Häuser, Bäume oder Berge eingeschränkt ist.

**Zirkulationsmodell:**

Klimamodell

**zonal:**

parallel zu den Breitenkreisen verlaufend

**Zölle:**

Zölle sind Eingangsabgaben, die nach Sätzen des → Gemeinsamen Zolltarifs auf eingeführte Drittlandswaren erhoben werden (Einfuhrzoll). Ausfuhr- oder Durchfuhrzölle gibt es nicht mehr. Seit dem 1. Januar 1975 fließen die Zölle als eigene Einnahmen voll den Gemeinschaften zu. Die von den deutschen Zollbehörden erhobenen Zölle müssen also von der Bundesrepublik an die EWG abgeführt werden (sogenannter Euro-Zoll).

Wegen der umfangreichen Abkommen der EWG mit Drittländern, die im Rahmen der Assoziierungs-, Freihandels- und Präferenzabkommen Zollfreiheit oder Zollermäßigung vorsehen, hat der Zoll in der Handels- und Wirtschaftspolitik erheblich an Bedeutung verloren (siehe auch → Zollpräferenzen).



**Zollpräferenzen:**

Zollpräferenzen sind Zollvergünstigungen, die aufgrund von zwei- oder mehrseitigen Assoziierungs-, Präferenz- oder Freihandelsabkommen oder aufgrund von Verordnungen der EG angewandt werden. Diese Abkommen enthalten die Bestimmungen verschiedener Art und insbesondere auch Tarifbestimmungen, die die Herabsetzung von bei der Einfuhr in die Gemeinschaft angewandten Zollsätzen für bestimmte Erzeugnisse mit Ursprung in den Ländern, mit denen diese Abkommen geschlossen worden sind, vorsehen.

**Zusätzlicher Treibhauseffekt:**

→ Treibhauseffekt.

Bei der Erstellung der Begriffserläuterungen wurde oftmals auf die im Bericht verwendete Literatur zurückgegriffen.

**Zyklone:**

Tiefdruckgebiet

**3. Abkürzungsverzeichnis**

AASE	Airborne Arctic Stratospheric Expedition
ABLE	Atmospheric Boundary Layer Experiment (Meßkampagnen der meteorologischen und chemischen Bedingungen in der unteren Atmosphärenschicht in Brasilien 1985 und 1987)
ACIMS	Achive Chemical Ionisation Mass Spectrometry
AGGG	Advisory Group on Greenhouse Gases (Beratergruppe Treibhausgase)
ATMOS	Atmospheric and Environmental Research Satellite (Atmosphären- und Umweltforschungssatellit)
AVHRR	Advanced Very High Resolution Radiometer (hochauflösendes Radiometer, mit denen die NOAA-Satelliten bestückt sind)
AVR	Atomversuchsreaktor
BImSchG	Bundes-Immissionsschutzgesetz
BIP	Bruttoinlandsprodukt
BMFT	Bundesministerium für Forschung und Technologie
BMU	Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit
BMWi	Bundesministerium für Wirtschaft
BMZ	Bundesministerium für wirtschaftliche Zusammenarbeit
BSP	Bruttosozialprodukt
BUV	Backscattered Ultraviolet Instrument
CMA	Chemical Manufacturers Association
D	Dimension
D	Deuterium, schwerer Wasserstoff
DAC	Development Assistance Committee (Entwicklungshilfeausschuß der OECD)
DIW	Deutsches Institut für Wirtschaftsforschung
DOAS	Differentielle Optische Absorptions Spektrometrie
ECE	Economic Commission for Europe (Regionale Wirtschaftskommission für Europa)
ECOSOC	Economic and Social Council (Wirtschafts- und Sozialrat der Vereinten Nationen)
ECU	European Currency Unit (Europäische Rechnungseinheit)
EFTA	Europäische Freihandelszone
EG	Europäischen Gemeinschaften
ENSO	El Niño-Southern Oscillation
EOS	Earth Observing System
EP	Europäisches Parlament
EPA	Environmental Protection Agency (Amerikanische Umweltschutzbehörde)
ERS	ESA Remote Sensing Satellite (Fernerkundungssatellit der ESA)
ESA	European Space Agency (Europäische Weltraumbehörde)
EVV	Elektrizitätsversorgungsunternehmen
EWG	Europäische Wirtschaftsgemeinschaft
EWGV	Vertrag zur Gründung der Europäischen Wirtschaftsgemeinschaft
FAO	Food and Agriculture Organization of the United Nations (Erährungs- und Landwirtschaftsorganisationen der Vereinten Nationen)
FCKW	Fluorchlorkohlenwasserstoffe
FKW	Fluorkohlenwasserstoffe
FZ	Finanzielle Zusammenarbeit
GATT	General Agreement on Tariffs and Trade (Allgemeines Zoll- und Handelsabkommen)
GISS	Goddard Institute for Space Studies an der University of Maryland, USA
GTZ	Deutsche Gesellschaft für Technische Zusammenarbeit
GuD	Gas- und Dampfturbinen-Technik
h	Plancksches Wirkungsquantum, eine physikalische Konstante
hPa	Hektopascal, Druck-Maßeinheit
H-FCKW	teilhalogenierte Fluorchlorkohlenwasserstoffe
HGÜ	Hochspannungsgleichstromübertragung
HTR	Hochtemperaturreaktor
IAEA	International Atomic Energy Agency (Internationale Atomenergiebehörde)
IBRD	International Bank for Reconstruction and Development (Internationale Bank für Wiederaufbau und Entwicklung)
ICSU	International Council of Scientific Unions (Internationaler Rat wissenschaftlicher Vereinigungen)
IEA	International Energy Agency (Internationale Energie-Agentur)
IGO	International Governmental Organization (Internationale Regierungsorganisationen)
IIASA	International Institute for Applied System Analysis (Internationales Institut für angewandte Systemanalyse in Laxenburg, Österreich)
IIED	International Institute for Environment and Development (Internationales Institut für Umwelt und Entwicklung)

ILO	International Labour Organization (Internationale Arbeitsorganisation)
IMF	International Monetary Fund (Internationaler Währungsfonds)
IMO	International Maritime Organization (Internationale Seefahrtsorganisation)
INFU	Institut für Umweltschutz (Universität Dortmund)
IPCC	Intergovernmental Panel on Climate Change (Intergouvernementaler Ausschuß über Klimaänderungen)
IR	Infrarot
ITTA	International Tropical Timber Agreement (Internationales Tropenholz-Übereinkommen)
ITTO	International Tropical Timber Organization (Internationale Tropenholz-Organisation)
ITU	International Telecommunication Union (Internationale Fernmeldeunion)
K	Kelvin, Temperatureinheit, $273^{\circ} \text{K} = 0^{\circ} \text{C}$
KW	Kohlenwasserstoffe (chemische Verbindungen, die sowohl Kohlenstoff als auch Wasserstoff enthalten)
kwhel	Kilowattstunde elektrisch
KWK	Kraft-Wärme-Kopplung
LBS	Ludwig-Bölkow-Systemtechnik
LIDAR	Light Detection and Ranging
LLDC	Least developed Countries (Gruppe der ärmsten Länder)
LWR	Leichtwasserreaktor
MAB	Man and the Biosphere (Der Mensch und die Biosphäre)
MAK	Maximale Arbeitsplatz Konzentration, Grenzwerte für Schadstoffe im Arbeitsschutz
MIESR	Matrix-Isolation-Elektronenspinresonanz-Spektrometrie
MIGA	Multilateral Investment Guarantee Agency (Multilaterale Investitions-Garantie-Agentur)
MIPAS	Michelson-Interferometer for Passive Atmospheric
MSS	Multispectral Scanner (Radiometer mit vielen Spektralbereichen auf den Landsat-Satelliten)
MV-Bereich	
MW	Megawatt
MWel	Megawatt elektrisch
mSv	Milli-Sievert
Sv	Mikro-Sievert
NASA	National Aeronautics and Space Administration
NCAR	National Center for Atmospheric Research (Nationales Zentrum für Atmosphärenforschung in Boulder, Colorado, USA)
NGO	Non Governmental Organization (Nicht-Regierungsorganisation)
NMKW	Nicht-Methan Kohlenwasserstoffe
NOAA	National Oceanic and Atmospheric Administration (Nationale ozeanische und atmosphärische Behörde der USA in Washington)
NOZE	National Ozone Expedition, amerikanische Maßkampagne von August bis Oktober 1986 an der Antarktisstation Mc Murdo
NTH	Nichttarifäre Handelshemmnisse
OAS	Organisation Amerikanischer Staaten
ODP-Wert	engl.: Ozone Depletion Potential; Maß für das → Ozonzerstörungspotential einer Substanz
OE	Öläquivalent
OECD	Organization for Economic Cooperation and Development (Organisation für wirtschaftliche Zusammenarbeit und Entwicklung der westlichen Industrieländer)
OFP	Ozonforschungsprogramm
OPEC	Organization of the Petroleum Exporting Countries (Organisation erdölexportierender Länder)
OTP	Ozone Trends Panel, Ozonuntersuchungsausschuß
PAN	Peroxiacethylnitrat
PJ	Petajoule
PSC	Polar Stratospheric Clouds, Polare Stratosphärische Wolken
PV	Photovoltaik
QBO	quasi-biennial oscillation, quasi-zweijähriger Zyklus
RSWG	Response Strategies Working Group (Arbeitsgruppe III des IPCC)
SAGE	Stratospheric Aerosol and Gas Experiment
SAR	Synthetic Aperture Radar (Radar mit synthetischer Apertur)
SBR	Schneller Brutreaktor
SBUV	Solar Backscattered Ultraviolet Instrument
SKE	Steinkohleeinheiten
SM	Spaltmaterial
SME	Solar Mesospheric Explorer
SPOT	Systeme Probatoire d'Observation de la Terre
SWCC	Second World Climate Conference (2. Weltklimakonferenz)
th	thermisch

T	Tritium; überschwerer Wasserstoff
TA-Luft	Technische Anleitung zur Reinhaltung der Luft, eine deutsche Rechtsvorschrift zur Ausfüllung des BImSchG
TERI	Tata Energy Research Institute
TFAP	Tropical Forestry Action Plan (Tropen-Forstwirtschafts-Aktionsplan)
TM	Thematic Mapper (Radiometer der Landsat-Satelliten)
TOMS	Total Ozone Mapping Spectrometer
TREES	Tropical Ecosystem Environment observations by Satellite (Beobachtungen der Umwelt in den Tropen vom Satelliten aus)
TW	Terawatt
UARS	Upper Atmosphere Research Satellite (USA)
UN	United Nations (Vereinte Nationen)
UNCSTD	United Nations Centre for Science and Technology for Development (Wissenschafts- und Technologiezentrum der Vereinten Nationen)
UNCTAD	United Nations Conference on Trade and Development (Konferenz der Vereinten Nationen für Handel und Entwicklung)
UNDP	United Nations Development Programme (Entwicklungsprogramm der Vereinten Nationen)
UNEP	United Nations Environment Programme (Umweltprogramm der Vereinten Nationen)
UNESCO	United Nations Educational, Scientific and Cultural Organization (Organisation der Vereinten Nationen für Erziehung, Wissenschaft und Kultur)
UV	Ultraviolett
VDEW	Verband deutscher Elektrizitätswirtschaft
WCAP	World Climate Applications Programme
WCDP	World Climate Data Programme
WCED	World Commission on Environment and Development (Weltkommission für Umwelt und Entwicklung)
WCIP	World Climate Impact Studies Programme
WCP	World Climate Programme (Welt-Klima-Programm)
WCRP	World Climate Research Programme (Welt-Klima-Forschungsprogramm)
WEC	World Energy Conference (Weltenergiekonferenz), ab 1. Januar 1990: World Energy Council (Weltenergieerat)
WEK	Windenergiekonverter
WIPO	World Intellectual Property Organization (Weltorganisation für geistiges Eigentum)
WMO	World Meteorological Organization (Weltorganisation für Meteorologie)
Wp	peak Watt
WRI	World Resources Institute (Weltressourcen-Institut)
WWF	World Wide Fund for Nature

**4. Chemische Formeln**

Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Aluminiumoxid
CCl <sub>3</sub> F	FCKW 11
CCl <sub>2</sub> F <sub>2</sub>	FCKW 12
CClF <sub>3</sub>	FCKW 13
C <sub>2</sub> Cl <sub>2</sub> F <sub>4</sub>	FCKW 114
C <sub>2</sub> Cl <sub>3</sub> F <sub>3</sub>	FCKW 113
C <sub>2</sub> ClF <sub>5</sub>	FCKW 115
CHClF <sub>2</sub>	Chlordifluormethan (H-FCKW 22)
CF <sub>2</sub> BrCl	Halon 1211
C <sub>2</sub> F <sub>4</sub> Br <sub>2</sub>	Halon 1301
CBrF <sub>3</sub>	Halon 2402
CCl <sub>4</sub>	Tetrachlorkohlenstoff
CH <sub>3</sub> CCl <sub>3</sub>	Methylchloroform
CH <sub>3</sub> Cl	Methylchlorid
CH <sub>3</sub> Br	Methylbromid
ClO	Chlormonoxid
BrO	Bromoxid
HF	Fluorwasserstoff
CO <sub>2</sub>	Kohlendioxid
CH <sub>4</sub>	Methan
N <sub>2</sub> O	Distickstoffoxid
OH	Hydroxylradikal
O <sup>*</sup>	angeregtes Sauerstoffatom
CO	Kohlenmonoxid
H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	Schwefelsäure
HNO <sub>3</sub>	Salpetersäure
HCl	Salzsäure
SO <sub>2</sub>	Schwefeldioxid
SO <sub>4</sub> <sup>-</sup>	Sulfat
NO	Stickstoffmonoxid
NO <sub>2</sub>	Stickstoffdioxid
C <sub>x</sub> H <sub>y</sub>	Kohlenwasserstoff
<sup>16</sup> O bzw. <sup>18</sup> O	Sauerstoffisotop mit dem Molekulargewicht
Si <sub>2</sub> O <sub>2</sub>	Siliciumoxid
MgO	Magnesiumoxid

**5. Vorsätze und Vorsatzzeichen-Erklärungen**

Piko	P	10 <sup>-12</sup>	Billionstel
Nano	n	10 <sup>-9</sup>	Milliardenstel
Mikro	μ	10 <sup>-6</sup>	Millionstel
Milli	m	10 <sup>-3</sup>	Tausendstel
Kilo	k	10 <sup>3</sup>	Tausend
Mega	M	10 <sup>6</sup>	Million
Giga	G	10 <sup>9</sup>	Milliarde
Tera	T	10 <sup>12</sup>	Billion
Peta	P	10 <sup>15</sup>	Billiarde
Exa	E	10 <sup>18</sup>	Trillion

## 6. Verzeichnis der Kommissionsdrucksachen

Nr.	Titel	Verfasser/Hrsg./Quelle
1	<b>Anhörung FCKW/Ozon I 29.02.88;</b> Fragen und Sachverständigen- katalog für die öffentliche . . .	Kommissionssekretariat 02.02.88
2	<b>Sitzungen 1. Halbjahr 1988;</b> Termine für die Sitzungen der Enquete-Kommission	Kommissionssekretariat 10.02.88
3	<b>Protokoll der 3. Sitzung;</b> Auszug aus dem . . . der Kommission am 28.01.88 (Berichte des BMFT und BMU zum Kommissionsauftrag)	Kommissionssekretariat 23.02.88
4	<b>Anhörung FCKW/Ozon I 29.02.88;</b> Schriftliche Stellungnahmen zur . . . Teil I	Kommissionssekretariat 23.02.88
5	<b>Anhörung FCKW/Ozon I 29.02.88;</b> Schriftliche Stellungnahmen zur . . . Teil II	Kommissionssekretariat 24.02.88
6	<b>Anhörung FCKW/Ozon I 29.02.88;</b> Schriftliche Stellungnahmen zur . . . Teil III	Kommissionssekretariat 25.02.88
7	<b>Anhörung FCKW/Ozon I 29.02.88;</b> Schriftliche Stellungnahme zur . . .	Ehhalt, D.H., KFA Jülich 25.02.88
8	<b>Anhörung FCKW/Ozon I 29.02.88;</b> Schriftliche Stellungnahme zur . . .	Fabian, P., MPI für Aeronomie 25.02.88
9	<b>Anhörung FCKW/Ozon I 29.02.88;</b> Schriftliche Stellungnahmen zur . . . Teil IV	Kommissionssekretariat 26.02.88
10	<b>Anhörung FCKW/Ozon I 29.02.88;</b> Schriftliche Stellungnahme zur . . . („Atmospheric Ozone“)	Watson, Robert T., Division of Earth Sciences, NASA 29.02.88
11	<b>Anhörung FCKW/Ozon I 29.02.88;</b> Schriftliche Stellungnahme zur . . .	Stolarski, Richard, NASA 29.02.88
12	<b>Anhörung FCKW/Ozon II 27.04.88;</b> Fragen- und Sachverständigen- katalog für die öffentliche . . .	Kommissionssekretariat 08.03.88
13	<b>Anhörung FCKW/Ozon III</b> <b>02./03.05.88;</b> Fragen- und Sachverständigen- katalog für die öffentliche . . .	Kommissionssekretariat 16.03.88
14	<b>Montreal Protocol;</b> . . . on substances that deplete the ozone layer (Final Act 1987)	Kommissionssekretariat 09.03.88
15	<b>Arbeit der Enquete-Kommission;</b> Vorläufige Arbeitsgliederung für die . . .	Kommissionssekretariat 21.03.88

Nr.	Titel	Verfasser/Hrsg./Quelle
16	<b>Anhörung FCKW/Ozon II 27.04.88;</b> Schriftliche Stellungnahmen zur . . . Teil I	Kommissionssekretariat 12.04.88
17	<b>Anhörung FCKW/Ozon III 02./03.05.88;</b> Schriftliche Stellungnahmen zur . . . Teil I	Kommissionssekretariat 14.04.88
18	<b>Anhörung FCKW/Ozon II 27.04.88;</b> Schriftliche Stellungnahmen zur . . . Teil II	Kommissionssekretariat 18.04.88
19	<b>Anhörung FCKW/Ozon III 02./03.05.88;</b> Schriftliche Stellungnahmen zur . . . Teil II	Kommissionssekretariat 19.04.88
20	<b>Anhörung FCKW/Ozon II 27.04.88;</b> Schriftliche Stellungnahmen zur . . . Teil III	Kommissionssekretariat 21.04.88
21	<b>Anhörung FCKW/Ozon III 02./03.05.88;</b> Schriftliche Stellungnahmen zur . . . Teil III	Kommissionssekretariat 25.04.88
22	<b>Anhörung FCKW/Ozon III 02./03.05.88;</b> Schriftliche Stellungnahmen zur . . . Teil IV	Kommissionssekretariat 27.04.88
23	<b>Anhörung FCKW/Ozon III 02./03.05.88;</b> Schriftliche Stellungnahmen zur . . . Teil V	Kommissionssekretariat 28.04.88
24	<b>Anhörung Treibhauseffekt I 06./07.06.88;</b> Fragen- und Sachverständigen- katalog für die öffentl. . . .	Kommissionssekretariat 29.04.88
25	<b>Anhörung Treibhauseffekt II 20.06.88;</b> Fragen- und Sachverständigen- katalog für die öffentl. . . .	Kommissionssekretariat 28.04.88
26	<b>Anhörung FCKW/Ozon III 02./03.05.88;</b> Schriftliche Stellungnahmen zur . . . Teil VI	Kommissionssekretariat 29.04.88
27	<b>Anhörung FCKW/Ozon II 27.04.88;</b> Schriftliche Stellungnahmen zur . . . Teil IV	Kommissionssekretariat 03.05.88
28	<b>Anhörung FCKW/Ozon III 02./03.05.88;</b> Schriftliche Stellungnahmen zur . . . Teil VII	Kommissionssekretariat 19.05.88
29	<b>Anhörung Treibhauseffekt I 06./07.06.88;</b> Schriftliche Stellungnahmen zur . . . Teil I	Kommissionssekretariat 19.05.88
30	<b>Anhörung Treibhauseffekt I 06./07.06.88;</b> Schriftliche Stellungnahmen zur . . . Teil II	Kommissionssekretariat 01.06.88

Nr.	Titel	Verfasser/Hrsg./Quelle
31	<b>Anhörung Treibhauseffekt I 06./07.06.88;</b> Schriftliche Stellungnahmen zur . . . Teil III	Kommissionssekretariat 03.06.88
32	<b>Anhörung Treibhauseffekt II 20.06.88;</b> Schriftliche Stellungnahmen zur . . . Teil I	Kommissionssekretariat 08.06.88
33	<b>Anhörung Treibhauseffekt I 06./07.06.88;</b> Schriftliche Stellungnahmen zur . . . Teil IV	Kommissionssekretariat 13.06.88
34	<b>Anhörung Treibhauseffekt II 20.06.88;</b> Schriftliche Stellungnahmen zur . . . Teil II	Kommissionssekretariat 14.06.88
35	<b>Anhörung Treibhauseffekt II 20.06.88;</b> Schriftliche Stellungnahmen zur . . . Teil III	Kommissionssekretariat 21.06.88
36	Anhörung Treibhauseffekt I <b>06./07.06.88;</b> Nachgereichte Schriftliche Stellungnahme von H. Flohn zur . . .	Kommissionssekretariat 05.08.88
37	<b>Sitzungen 2. Halbjahr 1988;</b> Termine für die Sitzungen der Enquete-Kommission	Kommissionssekretariat 15.09.88
38	<b>Anhörung Studien Energie/ Treibhauseffekt 25./26.11.88;</b> Fragen- und Sachverständigen- katalog für die nichtöffent- liche . . .	Kommissionssekretariat 17.11.88
39	<b>Sitzungen 1989;</b> Termine für die Sitzungen der Enquete-Kommission	Kommissionssekretariat 19.12.88
40	<b>Anhörung Studien Energie/ Treibhauseffekt 30.01.89;</b> Fragen- und Sachverständigen- katalog für die nichtöffent- liche . . .	Kommissionssekretariat 20.01.89
41	<b>Anhörung FCKW/Ozon I 29.02.88;</b> Übersetzung der Schriftlichen Stellungnahmen zur . . . Teil IV aus der EK-Drucksache 11/9	Kommissionssekretariat 20.02.89
42	<b>Anhörung FCKW/Ozon III 02./03.05.88;</b> Übersetzung der Schriftlichen Stellungnahmen zur . . . Teil VII aus der EK-Drucksache 11/28	Kommissionssekretariat <b>20.02.89</b>
43	<b>Anhörung FCKW/Ozon I 29.02.88;</b> Übersetzung der Schriftlichen Stellungnahme zur . . . von Prof. Dr. D.H. Ehhalt aus der EK-Drucksache 11/7	Kommissionssekretariat 20.02.89



Nr.	Titel	Verfasser/Hrsg./Quelle
44	<b>Anhörung FCKW/Ozon III 02./03.05.88;</b> Übersetzung der Schriftlichen Stellungnahmen zur . . . Teil V aus der EK-Drucksache 11/23	Kommissionssekretariat 15.03.89
45	<b>Anhörungen Tropenwald A-C;</b> Fragen- und Sachverständigen- kataloge zu drei . . . am 02./03.05.89, 17./18.05.89 und 07./08.06.89	Kommissionssekretariat 20.03.89
46	<b>Protokoll der 37. Sitzung;</b> Auszug aus dem . . . der Kommission am 01.03.89 (Berichte des BMU und BMZ zum Kommissionsauftrag)	Kommissionssekretariat 03.04.89
47	<b>Protokoll der 38. Sitzung;</b> Auszug aus dem . . . der Kommission am 02.03.89 (Bericht des BMFT zum Kommissionsauftrag)	Kommissionssekretariat 03.04.89
48	<b>Anhörung Treibhauseffekt I</b> 06./07.06.88; Auszugsweise Übersetzung der Schriftlichen Stellungnahmen zur . . . Teil II aus der EK-Drucksache 11/30	Kommissionssekretariat 17.04.89
49	<b>Anhörung Tropenwald Teil A am 02./03.05.89;</b> Schriftliche Stellungnahmen zur . . . Teil I	Kommissionssekretariat 20.04.89
50	<b>Anhörung FCKW/Ozon I 29.02.88;</b> Übersetzung der Schriftlichen Stellungnahme zur . . . Teil II von G. Brasseur aus der EK Drucksache 11/5	Kommissionssekretariat 17.04.89
51	<b>Anhörung Treibhauseffekt II 20.06.88;</b> Übersetzung der Schriftlichen Stellungnahme zur . . . Teil II von I. Mintzer aus der EK Drucksache 11/35	Kommissionssekretariat 20.04.89
52	<b>Anhörung FCKW/Ozon III 02./03.05.88;</b> Übersetzung der Schriftlichen Stellungnahme zur . . . Teil III von K. Hammitt aus der EK-Drucksache 11/21	Kommissionssekretariat 20.04.89
53	<b>Anhörung Tropenwald Teil A am 02./03.05.89;</b> Schriftliche Stellungnahmen zur . . . Teil II	Kommissionssekretariat 25.04.89
54	<b>Anhörung Tropenwald Teil A am 02./03.05.89;</b> Schriftliche Stellungnahmen zur . . . Teil III	Kommissionssekretariat 25.04.89
55	<b>Anhörung Tropenwald Teil A am 02./03.05.89;</b> Schriftliche Stellungnahmen zur . . . Teil IV	Kommissionssekretariat 26.04.89

Nr.	Titel	Verfasser/Hrsg./Quelle
56	<b>Anhörung Tropenwald Teil A am 02./03.05.89;</b> Schriftliche Stellungnahmen zur . . . Teil V	Kommissionssekretariat 02.05.89
57	<b>Anhörung Tropenwald Teil A am 02./03.05.89;</b> Schriftliche Stellungnahmen zur . . . Teil VI	Kommissionssekretariat 02.05.89
58	<b>Anhörung Tropenwald Teil A am 02./03.05.89;</b> Schriftliche Stellungnahmen zur . . . Teil VII	Kommissionssekretariat 02.05.89
59	<b>Anhörung Tropenwald Teil B am 16./17.05.89;</b> Schriftliche Stellungnahmen zur . . . Teil I	Kommissionssekretariat 08.05.89
60	<b>Anhörung Tropenwald Teil A am 02./03.05.89;</b> Schriftliche Stellungnahmen zur . . . Teil VIII	Kommissionssekretariat 08.05.89
61	<b>Anhörung Tropenwald Teil B am 16./17.05.89;</b> Schriftliche Stellungnahmen zur . . . Teil II	Kommissionssekretariat 08.05.89
62	<b>Anhörung Tropenwald Teil A am 02./03.05.89;</b> Schriftliche Stellungnahmen zur . . . Teil IX	Kommissionssekretariat 09.05.89
63	<b>Anhörung Tropenwald Teil B am 16./17.05.89;</b> Schriftliche Stellungnahmen zur . . . Teil III	Kommissionssekretariat 09.05.89
64	<b>Anhörung Tropenwald Teil C am 07./08.06.89;</b> Schriftliche Stellungnahmen zur . . . Teil I	Kommissionssekretariat 09.05.89
65	<b>Anhörung Tropenwald Teil A am 02./03.05.89;</b> Schriftliche Stellungnahmen zur . . . Teil X	Kommissionssekretariat 09.05.89
66	<b>Anhörung Ozon 12.06.89;</b> Fragen- und Sachverständigenkatalog für die öffentl. . . .	Kommissionssekretariat 11.05.89
67	<b>Anhörung Tropenwald Teil B am 16./17.05.89;</b> Schriftliche Stellungnahmen zur . . . Teil IV	Kommissionssekretariat 12.05.89
(neu) 68	<b>Anhörung Verkehr 26./27.06.89;</b> Fragen- und Sachverständigenkatalog für die öffentl. . . .	Kommissionssekretariat 20.05.89
69	<b>Anhörung Wälder der mittleren und nördlichen Breiten 19.06.89;</b> Fragen- und Sachverständigenkatalog für die öffentl. . . .	Kommissionssekretariat 23.05.89
70	<b>Anhörung Tropenwald Teil C am 07./08.06.89;</b> Schriftliche Stellungnahmen zur . . . Teil II	Kommissionssekretariat 26.05.89

Nr.	Titel	Verfasser/Hrsg./Quelle
71	<b>Anhörung Tropenwald Teil C am 07./08.06.89;</b> Schriftliche Stellungnahmen zur . . . Teil III	Kommissionssekretariat 30.05.89
72	<b>Anhörung Tropenwald Teil C am 07./08.06.89;</b> Schriftliche Stellungnahmen zur . . . Teil IV	Kommissionssekretariat 30.05..89
73	<b>Anhörung Tropenwald Teil C am 07./08.06.89;</b> Schriftliche Stellungnahmen zur . . . Teil V	Kommissionssekretariat 31.05.89
74	<b>Anhörung Tropenwald Teil C am 07./08.06.89;</b> Schriftliche Stellungnahmen zur . . . Teil VI	Kommissionssekretariat 01.06.89
75	<b>Anhörung Tropenwald Teil C am 07./08.06.89;</b> Schriftliche Stellungnahmen zur . . . Teil VII	Kommissionssekretariat 05.06.89
76	<b>Anhörung Tropenwald Teil C am 07./08.06.89;</b> Schriftliche Stellungnahmen zur . . . Teil VIII	Kommissionssekretariat 05.06.89
77	<b>Anhörung Tropenwald Teil C am 07./08.06.89;</b> Schriftliche Stellungnahmen zur . . . Teil IX	Kommissionssekretariat 05.06.89
78	<b>Anhörung Tropenwald Teil C am 07./08.06.89;</b> Schriftliche Stellungnahmen zur . . . Teil X	Kommissionssekretariat 07.06.89
79	<b>Anhörung Ozon 12.06.89;</b> Schriftliche Stellungnahmen zur . . . Teil I	Kommissionssekretariat 08.06.89
80	<b>Anhörung Ozon 12.06.89;</b> Schriftliche Stellungnahmen zur . . . Teil II	Kommissionssekretariat 12.06.89
81	<b>Anhörung Wälder der mittleren und nördlichen Breiten 19.06.89;</b> Schriftliche Stellungnahmen zur . . . Teil I	Kommissionssekretariat 13.06.89
82	<b>Anhörung Verkehr 26./27.06.89;</b> Schriftliche Stellungnahmen zur . . . Teil I	Kommissionssekretariat 14.06.89
83	<b>Anhörung Wälder der mittleren und nördlichen Breiten 19.06.89;</b> Schriftliche Stellungnahmen zur . . . Teil II	Kommissionssekretariat 15.06.89
84	<b>Anhörung Verkehr 26./27.06.89;</b> Schriftliche Stellungnahmen zur . . . Teil II	Kommissionssekretariat 20.06.89
85	<b>Anhörung Verkehr 26./27.06.89;</b> Schriftliche Stellungnahmen zur . . . Teil III	Kommissionssekretariat 26.06.89
86	<b>Anhörung Verkehr 26./27.06.89;</b> Schriftliche Stellungnahmen zur . . . Teil IV	Kommissionssekretariat 26.06.89

Nr.	Titel	Verfasser/Hrsg./Quelle
87	<b>Anhörung Tropenwald Teil B am 16./17.05.89;</b> Schriftliche Stellungnahmen zur . . . Teil V	Kommissionssekretariat 04.07.89
88	<b>Anhörung Tropenwald Teil A am 02./03.05.89;</b> Schriftliche Stellungnahmen zur . . . Teil XI	Kommissionssekretariat 19.07.89
89	<b>Anhörung FCKW/Ozon II 27.04.88;</b> Schriftliche Stellungnahmen zur . . . Teil IV	Kommissionssekretariat 31.07.89
90	<b>Anhörung Verkehr 26./27.06.89;</b> Schriftliche Stellungnahmen zur . . . Teil V	Kommissionssekretariat 07.08.89
91	<b>Anhörung Treibhauseffekt I 06./07.06.88;</b> Auszugsweise Übersetzung der Schriftliche Stellungnahmen zur . . . Teil IV aus der EK-Drucksache 11/33	Kommissionssekretariat 07.08.89
92	<b>Anhörung FCKW/Ozon II 27.04.88;</b> Übersetzung der Schriftlichen Stellungnahmen zur . . . Teil IV aus der EK-Drucksache 11/27	Kommissionssekretariat 09.08.89
93	<b>Anhörung Tropenwald Teil C am 07./08.06.89;</b> Schriftliche Stellungnahmen zur . . . Teil XI	Kommissionssekretariat 15.08.89
94	<b>Anhörung FCKW/Ozon I 29.02.88;</b> Übersetzung der Schriftlichen Stellungnahme von R. T. Watson aus der EK-Drucksache 11/10	Kommissionssekretariat 17.08.89
95	<b>Anhörung Ozon 12.06.89;</b> Schriftliche Stellungnahmen zur . . . Teil III	Kommissionssekretariat 17.08.89
96	<b>Anhörung Wälder der mittleren und nördlichen Breiten 19.06.89;</b> Schriftliche Stellungnahmen zur . . . Teil III	Kommissionssekretariat 17.08.89
97	<b>Anhörung Verkehr 26./27.06.89;</b> Schriftliche Stellungnahmen zur . . . Teil VI	Kommissionssekretariat 23.08.89
98	<b>Anhörung FCKW/Ozon III 02./03.05.88;</b> Übersetzung der Schriftlichen Stellungnahmen zur . . . Teil VI aus der EK-Drucksache 11/21	Kommissionssekretariat 23.08.89
99	<b>Anhörung Verkehr 26./27.06.89;</b> Schriftliche Stellungnahmen zur . . . Teil VII	Kommissionssekretariat 25.08.89
100	<b>Klimastabilisierung;</b> Politische Optionen für die globale . . .	Lashof, D. und D. Tirpak (Hrsg.), EPA 20.09.89
101	<b>Chlor- und Bromanreicherungen;</b> Reduktion von ozonabbauenden . . . in der Stratosphäre (Übersetzung)	Inst. for Energy and Environm. Research and Environm. Policy Inst. 25.09.89

Nr.	Titel	Verfasser/Hrsg./Quelle
102	<b>Tropische Regenwälder;</b> Schutz der . . . durch ökonomische Kompensation	Oberndörfer, Dieter 05.10.89
103	<b>Anhörung Wälder der mittleren und nördlichen Breiten 19.06.89;</b> Schriftliche Stellungnahmen zur . . . Teil IV	Kommissionssekretariat 05.10.89
104	<b>Tropenholzimport;</b> Zwei schriftliche Beantwortungen zum Verbot des . . . und der Stellung der einheimischen Waldwirtschaft zum . . .	Schweizer Nationalrat 03.10.89
105	<b>Treibhauseffekt;</b> Zwei Artikel zum Thema . . .	Hansen, James E. 04.10.89
106	<b>Tropenwälder;</b> Die Erhaltung der . . . geht alle Staaten an	Naumow, G. 05.10.89
107	<b>Sitzungen 2. Halbjahr 1988;</b> Termine für die Sitzungen der Enquete-Kommission	Kommissionssekretariat 09.10.89
108	<b>FCKW-Ersatzstoffe;</b> Mögliche . . . – Ergebnisse eines von der EPA veranstalteten internationalen Expertentreffens (Übersetzung)	EPA 16.10.89
109	<b>Carbon Dioxide Emissions;</b> Assessment of Strategies to Reduce . . . from Coal-based Power Plants	PrechtI, P. 20.10.89
110	<b>Energiewirtschaft;</b> Der Einfluß der . . . auf das Klima (Übersetzung)	Legasov, V.A., I.I. Kuzmin und A.N. Tschernoplekov 09.11.89
111	<b>Krypton-85-Emissionen;</b> Das Problem der . . . in die Atmosphäre	Israel, J.A., I.M. Na- zarov und A.G. Rjabo- sabko 11.11.89
112	<b>Climatic Change Problems;</b> . . . and Options for Practical Response – International Workshop Loccum 10.-12.03.89	The Beijer Institute, Evangelische Akademie Loccum 30.11.89
113	<b>Weltenergiekonferenz;</b> Unterlagen zum 14. Kongreß der . . . – Montreal 1989	Nationales Komitee der Weltenergiekonferenz für die BRD (DNK) 20.12.89
114	<b>Ozonschicht;</b> Neuseeländische Gesetze zum Schutz der . . . (Ozone Layer Protection Bill)	Deutsche Botschaft Wellington 20.12.89
115	<b>Ozone Protection;</b> Strategy for . . .	AEC 03.01.90
116	<b>Ozone Layer Depletion;</b> Health Effects of . . .	National Health and Medical Research Council, Melbourne 03.01.90
117	<b>Greenhouse Effect;</b> The . . . : Negotiating Targets	Grubb, M. 04.01.90

Nr.	Titel	Verfasser/Hrsg./Quelle
118	<b>Studienprogramm;</b> Internationale Konvention zum Schutz der Erdatmosphäre sowie Vermeidung und Reduktion energiebedingter klimarelevanter Spurengase	Kommissionssekretariat 15.01.90
119	<b>Amazonien;</b> Der Regenwald . . . – Abschlußbericht	Parlamentarische Untersuchungskommission 16.01.90
120	<b>Entwicklungszusammenarbeit;</b> Neue Konzepte in der . . . mit Lateinamerika?	Junk, W.J. 16.01.90
121	<b>Anhörung Treibhauseffekt III 29./30.03.90;</b> Fragen- und Sachverständigenkatalog für die öffentl. . . .	Kommissionssekretariat 29.01.90
122	<b>Deforestation;</b> . . . Rates in Tropical Forests and their Climatic Implications	Myers, N. 30.01.90
123	<b>Anhörung Treibhauseffekt III 29./30.03.90;</b> Schriftliche Stellungnahmen zur . . . Teil I	Kommissionssekretariat 19.03.90
124	<b>Treibhauseffekt;</b> Materialien zum Thema tropische Wälder und . . .	Myers, N. 20.03.90
125	<b>Anhörung Treibhauseffekt III 29./30.03.90;</b> Schriftliche Stellungnahmen zur . . . Teil II	Kommissionssekretariat 22.03.90
126	<b>Anhörung Treibhauseffekt III 29./30.03.90;</b> Schriftliche Stellungnahmen zur . . . Teil III	Kommissionssekretariat 26.03.90
127	<b>Energie und Umwelt;</b> Mitteilung der Kommission der Europäischen Gemeinschaften an den Rat über „. . . .“	EG-Kommission 26.03.90
128	<b>Ozeane;</b> Kohlendioxidemission und Aufnahme durch die . . . (Übersetzung)	Dyrssen, David 28.03.90
129	<b>Anhörung Treibhauseffekt III 29./30.03.90;</b> Schriftliche Stellungnahmen zur . . . Teil IV	Kommissionssekretariat 28.03.90
130	<b>Anhörung FCKW/Ozon IV 04.05.90;</b> Fragen und Sachverständigenkatalog für die öffentliche . . .	Kommissionssekretariat 03.04.90
131	<b>Nordpolare Stratosphäre;</b> Die . . . im Winter 1988/89 – Beobachtungen und ihre Deutung (BMFT-Workshop 12.-13.06.89)	Kommissionssekretariat 05.04.90
132	<b>Klimakatastrophe;</b> Materialien zur Tagung „Mit Voldampf in die . . .“	Evangelische Akademie Bad Boll und BUND 17.04.90
133	<b>Sustainable Energy;</b> A Greenhouse Energy Strategy – . . . Development for Australia	Deni Greene Consulting Services 23.04.90

Nr.	Titel	Verfasser/Hrsg./Quelle
134	<b>Krypton-85</b> ... – Literaturrecherche mit wissenschaftlicher Bewertung	Graßl, H. 23.04.90
135	<b>Anhörung FCKW/Ozon IV 04.05.90;</b> Schriftliche Stellungnahmen zur ... Teil I	Kommissionssekretariat 27.04.90
136	<b>Menschliche Aktivitäten</b> Auswirkungen ... auf die Erd- atmosphäre: Was zu forschen, was zu tun?	Crutzen, Paul J. 30.04.90
137	<b>Anhörung FCKW/Ozon IV 04.05.90;</b> Schriftliche Stellungnahmen zur ... Teil II	Kommissionssekretariat 02.05.90
138	<b>Anhörung FCKW/Ozon IV 04.05.90;</b> Schriftliche Stellungnahmen zur ... Teil III	Kommissionssekretariat 03.05.90
139	<b>Anhörung FCKW/Ozon IV 04.05.90;</b> Schriftliche Stellungnahmen zur ... Teil IV	Kommissionssekretariat 08.05.90
140	<b>Anhörung FCKW/Ozon IV 04.05.90;</b> Schriftliche Stellungnahmen zur ... Teil V	Kommissionssekretariat 22.05.90
141	<b>Vorschlag einer Verordnung</b> (EWG) des Rates über Stoffe, die zu einem Abbau der Ozonschicht führen.	Bundesrat Drs. 247/90 08.06.90
142	<b>BMU</b> Beschluß des Bundeskabinetts vom 30. Mai 1990; Verordnung zum Verbot von be- stimmten die Ozonschicht ab- bauenden Halogenkohlenwasser- stoffen	BMU 12. Juni 1990
143	<b>Die Entwaldung der Tropen:</b> ein ökonomischer Fehlschlag	Spektrum der Wissenschaft Juni 90
144	<b>Taking Stock:</b> The tropical forestry action plan after five years. World Resources Institute, Robert Winterbottom	04/07/90
145	<b>Least-Cost Utility Planning</b> Dt. Übersetzung des engl. Originals, das als AU 11/323 verteilt wurde	Sekr. 12/07/90
146	<b>Bestandsaufnahme und Perspektiven</b> der Atom-und Energiewirtschaft der DDR (Zusammenfassung)	Öko-Institut 14.08.90
147	<b>Ozonzerstörung in der arktischen</b> Stratosphäre	MP/Kernphysik 06.09.90

---

Druck: Bonner Universitäts-Buchdruckerei, 5300 Bonn

Alleinvertrieb: Verlag Dr. Hans Heger, Postfach 20 13 63, Herderstraße 56, 5300 Bonn 2, Telefon 02 28/36 35 51, Telefax 02 28/36 12 75  
ISSN 0722-8333