

Unterrichtung

durch die Bundesregierung

Bericht der Bundesregierung über Umweltradioaktivität und Strahlenbelastung im Jahr 1989

Inhalt

	Seite
I. Auftrag und Zusammenfassung	3
1. Auftrag	3
2. Zusammenfassung	3
II. Natürliche und zivilisatorisch veränderte natürliche Strahlenexposition	4
III. Zivilisatorische Strahlenexposition	4
1. Kerntechnische Anlagen	4
1.1 Zusammenfassung der Ergebnisse für kerntechnische Anlagen	4
1.2 Jahresabgaben radioaktiver Stoffe aus kerntechnischen Anlagen	5
1.3 Berechnete obere Werte der Strahlenexposition in der Umgebung kern- technischer Anlagen	5
2. Anwendung radioaktiver Stoffe und ionisierender Strahlen in der Medi- zin	6
3. Anwendung radioaktiver Stoffe und ionisierender Strahlen in For- schung, Technik und Haushalt	6
3.1 Industrieerzeugnisse und technische Strahlenquellen	6
3.2 Störstrahler	7
4. Berufliche Tätigkeit	7
5. Besondere Vorkommnisse	7
6. Fall-out von Kernwaffenversuchen	7
IV. Strahlenexposition durch den Unfall im Kernkraftwerk Tschernobyl .	8

	Seite
V. Strahlendosis und Strahlenwirkung	8
1. Strahlendosis und ihre Einheiten	8
2. Externe und interne Bestrahlung	9
3. Stochastische und nicht-stochastische Strahlenwirkung	10
4. Genetisch vererbare Defekte	11
5. Induktion von Leukämie und Krebs	11
6. Risikoabschätzung	12
7. Effektive Äquivalentdosis	13
Tabellen	17
Abbildungen	33

I. Auftrag und Zusammenfassung

1. Auftrag

Das Strahlenschutzvorsorgegesetz vom 19. Dezember 1986 (BGBl. I S. 2610) sieht die jährliche Berichterstattung durch den Bundesminister für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit an den Deutschen Bundestag und den Bundesrat über die Entwicklung der Radioaktivität in der Umwelt vor. Der Bericht für das Jahr 1989 wird hiermit vorgelegt. Er umfaßt die wichtigsten Informationen und Änderungen im Bereich der Umweltradioaktivität und Strahlenbelastung gegenüber den Vorjahren. Umfassenderes Datenmaterial wird jeweils in den ausführlichen Jahresberichten über „Umweltradioaktivität und Strahlenbelastung“ wiedergegeben.

2. Zusammenfassung

Der Bericht behandelt

- die natürliche und zivilisatorisch veränderte natürliche Strahlenexposition (Kapitel II),
- die zivilisatorische Strahlenexposition (Kapitel III) und
- die Strahlenexposition durch den Unfall im Kernkraftwerk Tschernobyl (Kapitel IV).

Kapitel V enthält eine allgemeine Einführung zum Thema „Strahlendosis und Strahlenschutz“.

Die natürliche Strahlenexposition setzt sich zusammen aus der Strahlenexposition von außen durch die kosmische und terrestrische Komponente der natürlichen Strahlung und aus der Strahlenexposition von innen durch die Aufnahme natürlich radioaktiver Stoffe in den Körper. Veränderungen der Umwelt des Menschen durch technische Entwicklungen, die eine unbeabsichtigte Anreicherung natürlich radioaktiver Stoffe zur Folge haben, führen zu einer zivilisatorisch bedingten Erhöhung der Strahlenexposition aus natürlichen Strahlenquellen.

Die Beiträge zur zivilisatorischen Strahlenexposition der Bevölkerung resultieren aus dem Betrieb kerntechnischer Anlagen, aus der Anwendung radioaktiver Stoffe und ionisierender Strahlung in Medizin, Forschung, Technik und Haushalt, aus der beruflichen Tätigkeit, aus Strahlenunfällen und besonderen Vorkommnissen in Anlagen der Bundesrepublik Deutschland sowie aus dem Fall-out von Kernwafferversuchen in der Atmosphäre und dem Unfall im Kernkraftwerk Tschernobyl vom 25. April 1986.

Die Strahlenexposition der Bevölkerung der Bundesrepublik Deutschland im Jahre 1989 ist in der Tabelle 1 nach den verschiedenen Strahlenquellen aufgeschlüsselt. Die effektive Dosis aus natürlichen Strahlenquellen, die im Gegensatz zur genetisch si-

gnifikanten Dosis auch die Strahlenexposition anderer Organe und damit auch der Lunge durch Radon berücksichtigt (s. Abschnitt II), beträgt im Mittel 2,4 mSv mit einer mittleren Schwankung von ca. 1 mSv. Die durch die Anwendung radioaktiver Stoffe und ionisierender Strahlen in der Medizin hervorgerufene effektive Dosis von 1,5 mSv ist mit einer Schwankungsbreite von ca. 50 % behaftet; auf diese Schwankungsbreite wird im Kapitel III.2 näher eingegangen. Bei den übrigen Beiträgen zur zivilisatorischen Strahlenexposition liegen die tatsächlichen Werte unter den angegebenen oberen Grenzen.

Als zusammenfassendes Ergebnis ist für das Jahr 1989 folgendes festzustellen:

- Der Unfall im Kernkraftwerk Tschernobyl hat die Umweltradioaktivität in der Bundesrepublik Deutschland verändert. Die dadurch bedingte Strahlenexposition der Bevölkerung ging 1989 auf ca. 1 bis 2 % der natürlichen Strahlenexposition (2,4 mSv) zurück. Südlich der Donau kann die Dosis, je nach örtlichen Gegebenheiten, in Einzelfällen bis zu einem Faktor 5 höher sein.
- Eine statistisch gesicherte Veränderung der Dosis der Bevölkerung der Bundesrepublik Deutschland aus den übrigen Beiträgen ist gegenüber den Vorjahren bei Berücksichtigung der Unsicherheiten, mit denen die Hauptbeiträge zu dieser Dosis behaftet sind, nicht feststellbar.
- Die Strahlendosis durch die Radonkonzentrationen in Wohnungen bedingt ca. 50 % der Strahlendosis natürlichen Ursprungs.
- Der Beitrag der Strahlenexposition durch Kernkraftwerke und sonstige kerntechnische Anlagen in der Bundesrepublik Deutschland zur effektiven Dosis der Bevölkerung blieb auch im Jahr 1989 unter 1 % des Beitrages der zivilisatorischen Strahlenexposition. Die Jahresemissionen radioaktiver Stoffe lagen bei allen kerntechnischen Anlagen unterhalb, bei den meisten weit unterhalb der genehmigten Werte.
- Der größte Beitrag der zivilisatorischen Strahlenexposition wird durch die Anwendung ionisierender Strahlen in der Medizin, vor allem durch die Röntgendiagnostik, verursacht. Die Untersuchung des Bundesgesundheitsamtes „Strahlenbelastung der Bevölkerung in der Bundesrepublik Deutschland durch medizinische Maßnahmen, insbesondere in der Röntgendiagnostik“ zeigt zwar, daß sich wesentliche, die Strahlenbelastung beeinflussende Parameter (z. B. Zahl und Qualität der Untersuchungen, Untersuchungsmethoden) verbessert haben. Die daraus resultierende Verringerung der Dosis kann jedoch rechnerisch nicht als exakter Zahlenwert dargestellt werden, da die ermittelte Dosis eine sehr große Schwankungsbreite in sich birgt.

- Obwohl die Anzahl der beruflich strahlenexponierten Personen weiterhin zugenommen hat, bleibt der Anteil der beruflichen Strahlenexposition am Beitrag der zivilisatorischen Strahlenexposition unter einem Prozent.
- Der Beitrag der Strahlenexposition durch die in den vergangenen Jahrzehnten in der Atmosphäre durchgeführten Kernwaffenversuche zur Dosis ist weiterhin rückläufig. Im Jahr 1989 wurden keine Kernwaffenversuche in der Atmosphäre durchgeführt.

II. Natürliche und zivilisatorisch veränderte natürliche Strahlenexposition

Während des Berichtszeitraumes wurden keine Erkenntnisse über eine wesentliche Änderung der Strahlenexposition der Bevölkerung durch natürliche und zivilisatorisch veränderte Strahlenquellen bekannt. Auch die Einschätzung der Strahlenexposition durch Radon und dessen Zerfallsprodukte muß nicht korrigiert werden. Dies beruht auf zahlreichen weiteren Messungen der Radonkonzentration in Wohnungen, die in Folge von Alarmmeldungen der Medien (USA: „jährlich 20 000 Lungenkrebstote durch Radon“) von der beunruhigten Bevölkerung angefordert wurden. Ab Oktober 1988 bis Ende 1989 gingen am Institut für Strahlenhygiene ca. 1 500 Anforderungen zur Radonmessung aus allen Gebieten der Bundesrepublik Deutschland ein (zahlreiche weitere Institutionen begannen ebenfalls mit Radonmessungen; es liegen aber keine Informationen über Meßfrequenzen vor). Die Messungen wurden mit Aktivkohledosimetern durchgeführt, die in der Regel drei Tage exponiert und dann am Institut ausgewertet werden.

Ein Vergleich mit der früheren Erhebung der Radonkonzentration in Wohnungen in der Bundesrepublik Deutschland ist nur bedingt möglich, da damals die Meßstandorte statistisch repräsentativ ausgewählt wurden und die Messung mit Kernspurdetektoren erfolgte, die mindestens drei Monate exponiert werden mußten.

Bis Ende 1989 konnten rund 600 Meßanforderungen erledigt werden. Auf der Basis dieser Ergebnisse erhält man als arithmetischen Mittelwert über alle Wohn- und Aufenthaltsräume (d. h. ausgenommen Keller) eine Radonkonzentration von 67 Bq/m³ (zum Vergleich: Der Medianwert dieser Messungen liegt bei 30 Bq/m³). Dabei traten Einzelwerte bis 3 000 Bq/m³ auf. Der Anteil der Wohnungen, die über dem Wert von 250 Bq/m³, den die Strahlenschutzkommission als Obergrenze des Normalbereiches der Radonkonzentration bezeichnet, liegen, beträgt der jetzigen Erhebung nach rund 4 %. Dies ist vermutlich aber auf die überproportionale Nachfrage an Messungen in Gebieten mit bekannt erhöhter Strahlenexposition (z. B. Fichtelgebirge, Eifel, Neuwieder Becken) zurückzuführen.

Die Ergebnisse im Berichtszeitraum zeigen, daß zum einen der bisherige Mittelwert von 50 Bq/m³ Radon nicht korrigiert werden muß, daß aber zum anderen die Schwankungsbreite der Radonkonzentration größer ist als bisher angenommen.

Die in ausgewählten Wohnungen durchgeführten Sanierungsmaßnahmen wurden fortgesetzt. Erste Ergebnisse zeigen, daß die Radonkonzentration durch bauliche Maßnahmen auf ein Drittel des Ausgangswertes gesenkt werden konnte.

III. Zivilisatorische Strahlenexposition

1. Kerntechnische Anlagen

1.1 Zusammenfassung der Ergebnisse für kerntechnische Anlagen

Die für das Jahr 1989 ermittelten Werte für die Abgabe radioaktiver Stoffe in Abluft und Abwasser aus kerntechnischen Anlagen zeigen, daß die von den zuständigen Behörden festgelegten Höchstwerte für die jährlichen Emissionen in allen Fällen eingehalten wurden. Die tatsächlichen Jahresabgaben liegen im allgemeinen deutlich unter den Genehmigungswerten, wie beispielsweise für Kernkraftwerke der Vergleich zwischen den Werten der Tabelle 2 und übli-

chen Genehmigungswerten von ca. 10¹⁵ Becquerel für Edelgase, ca. 3 · 10¹⁰ Bq für Aerosole und ca. 10¹⁰ Bq für Iod 131 zeigt.

Die für 1989 aus den Jahresabgaben nach der „Allgemeinen Verwaltungsvorschrift zu § 45 Strahlenschutzverordnung: Ermittlung der Strahlenexposition durch die Ableitung radioaktiver Stoffe aus kerntechnischen Anlagen oder Einrichtungen“ ermittelten Werte der Strahlenexposition liegen im Bereich der entsprechenden Werte des Vorjahres. Die oberen Werte der Strahlenexposition für Einzelpersonen durch Emissionen radioaktiver Stoffe aus kerntechnischen Anlagen haben die in der Strahlenschutzverordnung festgelegten Dosisgrenzwerte nicht über-

schritten und betragen bei der effektiven Dosis und bei den einzelnen Organdosen weniger als 10 % des jeweiligen Dosisgrenzwertes; damit sind die oberen Werte der Strahlenexposition durch Ableitungen radioaktiver Stoffe aus kerntechnischen Anlagen deutlich kleiner als die Schwankungsbreite der natürlichen Strahlenexposition in der Bundesrepublik Deutschland.

Die Summierung aller Beiträge von kerntechnischen Anlagen in der Bundesrepublik Deutschland sowie im angrenzenden Ausland zur Strahlenexposition der Bevölkerung der Bundesrepublik Deutschland führte auch 1989 zu deutlich weniger als 10 μSv pro Jahr mittlerer effektiver Dosis (Tabelle 1).

1.2 Jahresabgaben radioaktiver Stoffe aus kerntechnischen Anlagen

Die Abgaben radioaktiver Stoffe mit Abluft und Abwasser aus kerntechnischen Einrichtungen werden nach der „Richtlinie zur Emissions- und Immissionsüberwachung kerntechnischer Anlagen“ von den Betreibern der einzelnen Anlagen ermittelt und an die zuständigen Aufsichtsbehörden berichtet. Einzelheiten über Umfang der Messungen, Meßverfahren, Probenahme, Instrumentierung und Dokumentation der Meßergebnisse sind in Regeln des Kerntechnischen Ausschusses festgelegt. Die von den Betreibern der Anlagen vorzunehmenden Messungen werden durch Kontrollmessungen behördlich beauftragter Sachverständiger entsprechend der Richtlinie über die „Kontrolle der Eigenüberwachung radioaktiver Emissionen aus Kernkraftwerken“ überprüft.

Die für 1989 ermittelten Jahresabgaben radioaktiver Stoffe in Abluft und Abwasser von Kernkraftwerken sind in den Tabellen 2 und 3 angegeben und nach Nuklidgruppen aufgeschlüsselt. Sie liegen in der Größenordnung der Abgaben der Vorjahre und unterschreiten im allgemeinen deutlich die entsprechenden Genehmigungswerte. In Tabelle 4 sind die Daten über die Ableitung radioaktiver Stoffe mit Abluft und Abwasser aus den Kernforschungszentren Karlsruhe und Jülich im Jahr 1989 zusammengefaßt. Die Ableitungen radioaktiver Stoffe aus den übrigen Forschungsreaktoren im Bundesgebiet betragen im Mittel nur einige Prozent der Ableitungen von Kernkraftwerken. Tabelle 5 enthält Angaben über die Ableitung radioaktiver Stoffe in Abluft und Abwasser aus Kernbrennstoffverarbeitenden Betrieben.

Im benachbarten Ausland waren Ende 1989 in Grenz-nähe, d. h. bis zu einer Entfernung von 30 km zur deutschen Grenze, die in Tabelle 6 aufgeführten kerntechnischen Anlagen in Betrieb. Das Kernkraftwerk Mühleberg wurde trotz der größeren Entfernung zur deutschen Grenze mitberücksichtigt, weil es im Einzugsgebiet des Rheins liegt. Über die Jahresemissionen kerntechnischer Anlagen in EG-Ländern berichtet die Kommission der Europäischen Gemeinschaften. Die Jahresabgaben der schweizerischen Anlagen werden in den jährlichen Berichten der Eidgenössischen Kommission zur Überwachung der Radioaktivität veröffentlicht.

1.3 Berechnete obere Werte der Strahlenexposition in der Umgebung kerntechnischer Anlagen

Aus den Ergebnissen der Emissionsüberwachung wird die Strahlenexposition der Bevölkerung in der Umgebung der kerntechnischen Anlagen nach dem in der „Allgemeinen Verwaltungsvorschrift zu § 45 Strahlenschutzverordnung: Ermittlung der Strahlenexposition durch die Ableitung radioaktiver Stoffe aus kerntechnischen Anlagen oder Einrichtungen“ festgelegten Verfahren ermittelt.

Die für Einzelpersonen angegebenen Expositionswerte stellen obere Werte dar, da sie unter der Annahme eines ständigen Aufenthaltes am Ort der größten Strahlenexposition von außen sowie unter der Annahme berechnet wurden, daß die gesamte Nahrung an der ungünstigsten Einwirkungsstelle erzeugt wird. Weiterhin werden ungünstige Verzehrsgewohnheiten unterstellt.

Die Ergebnisse der Berechnung der Strahlenexposition der Bevölkerung im Jahr 1989 in der Umgebung von Kernkraftwerken durch die Abgabe radioaktiver Stoffe mit der Abluft enthält Tabelle 7. Angegeben ist die effektive Dosis für Erwachsene sowie die Schilddrüsendosis für Kleinkinder über sämtliche relevanten Expositionspfade: Gammastrahlung aus der Abluftfahne (Gammastrahlung am Boden abgelagerter radioaktiver Stoffe, Inhalation und Ingestion. Dabei wurde die seit der Inbetriebnahme emittierte Aktivität der langlebigen Aerosole und ihre Akkumulierung im Boden berücksichtigt. Tabelle 7 zeigt wie im Vorjahr als größten Wert der effektiven Dosis für Erwachsene 4 μSv beim Kernkraftwerk Würgassen, der den Grenzwert der Strahlenschutzverordnung von 300 μSv um den Faktor 75 unterschreitet. Für die Schilddrüsendosis eines Kleinkindes ergeben die Rechnungen als größten Wert 15 μSv , ebenfalls beim Kernkraftwerk Würgassen, der einem Sechzigstel des Dosisgrenzwertes für die Schilddrüse entspricht.

In Tabelle 8 sind die aus den Abgaben radioaktiver Stoffe mit Abwasser aus Kernkraftwerken resultierenden oberen Werte der effektiven Dosis von Einzelpersonen zusammengestellt; hierbei wurden ebenfalls ungünstige Verzehr- und Lebensgewohnheiten angenommen, insbesondere ein hoher Konsum an Flußfisch, der in der Kühlwasserfahne gefangen wird. Der größte Wert der effektiven Dosis beträgt 0,5 μSv beim Kernkraftwerk Emsland. Im Vorjahr lag er bei 0,4 μSv beim Kernkraftwerk Gundremmingen. Unterschiede zum Vorjahr sind durch Änderungen in den Emissionen und in den Vorfluterabflüssen bedingt.

Die in Tabelle 9 angegebenen Werte für die entsprechenden Strahlenexpositionen durch die Abgabe radioaktiver Stoffe mit der Abluft aus Kernforschungszentren stammen aus den Jahresberichten und aus zusätzlichen Angaben der Strahlenschutzabteilungen der Kernforschungszentren Karlsruhe und Jülich. Die Tabelle weist für die effektive Dosis eines Erwachsenen über sämtliche relevanten Expositionspfade als größten Wert an der ungünstigsten Einwirkungsstelle bei der Kernforschungsanlage Jülich für 1989 einen Wert von 8,9 μSv auf; im Vorjahr hatte sich ein größter Wert von 4,5 μSv beim Kernforschungszentrum Karls-

ruhe ergeben. Als größten Wert für die Schilddrüsendosis eines Kleinkindes ergaben die Berechnungen für 1989 beim Kernforschungszentrum Karlsruhe an der ungünstigsten Einwirkungsstelle 64 μSv . Im Vorjahr lag der entsprechende Wert bei 114 μSv .

Für die Strahlenexposition über das Abwasser aus Kernforschungszentren ergibt die Abschätzung aufgrund von Meßwerten, die bei radioökologischen Untersuchungen gewonnen wurden, einen oberen Wert von 20 μSv pro Jahr.

Für die kernbrennstoffverarbeitenden Betriebe in Hanau, Karlstein, Lingen und Gronau sind in Tabelle 10 die für die ungünstigste Einwirkungsstelle berechneten oberen Werte der effektiven Dosis eines Erwachsenen und der Lungendosis eines Kleinkindes durch Emission von Alphastrahlern in der Abluft angegeben. Der höchste Wert der effektiven Dosis eines Erwachsenen beträgt 2 μSv , der Lungendosis eines Kleinkindes 15 μSv ; im Vorjahr hatten die entsprechenden Werte bei 1 bzw. 8 μSv gelegen.

Die durch die Abgaben von Alphastrahlern mit dem Abwasser bedingten Werte der effektiven Dosis Erwachsener sind in Tabelle 11 aufgeführt. Sie liegen mit maximal 0,6 μSv für die Siemens AG, Betriebsteil Uran-Verarbeitung in Hanau geringfügig über den Werten des Vorjahres (0,4 μSv).

Die Berechnungen nach der Allgemeinen Verwaltungsvorschrift zu § 45 Strahlenschutzverordnung zur Strahlenexposition der Bevölkerung durch den Betrieb kerntechnischer Anlagen in Nachbarländern (Tabelle 6) ergeben 1989 auf Bundesgebiet an den ungünstigsten Einwirkungsstellen für die effektive Dosis obere Werte im Bereich von 1 μSv pro Jahr. Für die Schilddrüsendosis von Kleinkindern über den Weide-Kuh-Milch-Pfad ergibt sich rechnerisch ein oberer Wert von ca. 20 μSv pro Jahr. Bei den im Rahmen der Umgebungsüberwachung durchgeführten Messungen des Radioiodgehaltes von Milchproben aus grenznahen Weidegebieten wurde im Berichtszeitraum Iod 131 in Milch nicht nachgewiesen.

2. Anwendung radioaktiver Stoffe und ionisierender Strahlen in der Medizin

Die zivilisatorische Strahlenexposition der Bevölkerung durch die medizinische Anwendung radioaktiver Stoffe und ionisierender Strahlen betrug im Jahr 1989 im Mittel ca. 1,5 mSv (effektive Dosis).

Der größte Anteil an der zivilisatorischen Strahlenexposition der Bevölkerung resultiert aus der medizinischen Röntgendiagnostik.

Der in Tabelle 1 angegebene Zahlenwert für die mittlere effektive Dosis beruht auf groben Schätzungen, die durch repräsentative Erhebungen über die Häufigkeit der wichtigsten röntgendiagnostischen Untersuchungen und der dabei benötigten Dosen ersetzt werden sollten.

Einerseits zeichnet sich bei manchen Röntgenuntersuchungen ein rückläufiger Trend ab. Ursache hierfür sind sowohl eine strengere Indikationsstellung von seiten der Ärzte aufgrund eines gestiegenen Strahlen-

schutzbewußtseins als auch eingeführte alternative Untersuchungsverfahren, insbesondere Sonographie und Endoskopie. Andererseits gibt es eine Zunahme moderner, dosisintensiver Untersuchungsverfahren, wie Computertomographie und digitale Subtraktionsangiographie. Trotzdem kann ein Rückgang der Strahlenexposition des einzelnen untersuchten Patienten angenommen werden, der auf die Einführung dosissparender Untersuchungstechniken, z. B. durch den Einsatz von empfindlicheren Röntgenbildverstärkern, Belichtungsautomatiken und verbesserten Film-Foliensystemen, zurückzuführen ist.

Auch die gesetzlichen Vorschriften (Röntgenverordnung und Strahlenschutzverordnung) dürften sich auf die Strahlenexposition des einzelnen und der Gesamtheit positiv auswirken. Die neue Röntgenverordnung vom 8. Januar 1987 beinhaltet zahlreiche weitere Maßnahmen zur Verbesserung des Strahlenschutzes in der Röntgendiagnostik, die durch entsprechende Richtlinien konkretisiert sind. Dadurch sind von gesetzgeberischer Seite die Voraussetzungen zur Verbesserung der ärztlichen Fachkunde und der Kenntnisse des medizinischen Hilfspersonals im Strahlenschutz geschaffen und in der Folge Verbesserungen der Untersuchungsverfahren bzw. Untersuchungstechniken mit angeregt. Darüber hinaus sind weitere Vorschriften über Sachverständigenprüfungen, über technische Standards von Röntgeneinrichtungen und über qualitätssichernde Maßnahmen erlassen worden. Auch das vom Deutschen Bundestag geforderte „Röntgennachweisheft“ ist eingeführt worden, um so Wiederholungsuntersuchungen auf das notwendige Maß zu begrenzen.

Die Nuklearmedizin liefert aufgrund der niedrigeren Anwendungsfrequenzen einen wesentlich niedrigeren Beitrag zur Strahlenexposition der Bevölkerung. Er ist etwa ein Zehntel des Beitrages durch die Röntgendiagnostik.

Bei der Wertung der Strahlenexposition durch medizinische Maßnahmen ist jedoch zu berücksichtigen, daß daraus ein Strahlenrisiko für den einzelnen resultiert, welches bei gewissenhafter Indikationsstellung gegenüber dem Nutzen für seine Gesundheit in den Hintergrund tritt.

3. Anwendung radioaktiver Stoffe und ionisierender Strahlen in Forschung, Technik und Haushalt

3.1 Industrieerzeugnisse und technische Strahlenquellen

Bestimmte Industrieerzeugnisse, wie z. B. wissenschaftliche Instrumente, elektronische Bauteile, Leuchtstoffröhren, Rauch- und Feuermelder, keramische Gegenstände u. a., enthalten radioaktive Stoffe verschiedener Art und Aktivität. Der Umgang mit diesen Erzeugnissen wird durch ein differenziertes Anzeige- und Genehmigungssystem geregelt, bei dem auch ein genehmigungsfreier Umgang z. B. durch Bauartzulassung möglich ist. Die Einhaltung der Vorschriften der Strahlenschutzverordnung gewährleistet, daß der Umgang mit diesen radioaktiven Indu-

strierzeugnissen einschließlich Antistatika, keramischen Gegenständen und Zahnmassen weniger als 10 μSv pro Jahr zur effektiven Dosis der Bevölkerung beiträgt.

Bei einigen technischen Prozessen werden radioaktive Stoffe zur Messung und Steuerung (z. B. Füllstand-, Dicke- und Dichtemessung) oder zur Qualitätskontrolle bei der zerstörungsfreien Materialprüfung eingesetzt. Der Umgang mit diesen technischen Strahlenquellen unterliegt, falls das Gerät selbst keine Bauartzulassung besitzt, der Genehmigungspflicht; die damit verbundenen Auflagen garantieren, daß auch der hieraus resultierende Beitrag zur mittleren Strahlenexposition der Bevölkerung niedriger als 10 μSv pro Jahr ist.

3.2 Störstrahler

Störstrahler sind Geräte oder Einrichtungen, die Röntgenstrahlen erzeugen, ohne daß sie zu diesem Zweck betrieben werden (z. B. Elektronenmikroskope und Hochspannungsgleichrichter); sie unterliegen einer grundsätzlichen Genehmigungspflicht, sofern eine Bauartzulassung nicht vorliegt. Zu den Störstrahlern gehören auch Kathodenstrahlröhren in Bildschirmgeräten.

Der Beitrag von Störstrahlern zur Strahlenexposition der Bevölkerung wird mit einer effektiven Dosis von weniger als 10 μSv pro Jahr abgeschätzt.

4. Berufliche Tätigkeit

Alle beruflich strahlenexponierten Personen, bei denen die Möglichkeit einer erhöhten Strahlenexposition von außen besteht, werden mit Personendosimetern überwacht, die von den fünf nach Landesrecht zuständigen amtlichen Personendosismeßstellen ausgeben und ausgewertet werden. Die Zahl der überwachten Personen betrug (gerundet) im Berichtsjahr 306 000, davon im Bereich Medizin 203 000. Abbildung 1 zeigt den Verlauf seit 1981.

Die nachstehenden Dosisangaben beziehen sich auf Photonenstrahlen, da diese in nahezu allen Kontrollbereichen die Dosis bestimmen. Dosisbeiträge durch Neutronen- und Betastrahlen sind nur in wenigen Fällen von Bedeutung. Die mittlere Jahres-Personendosis aller Überwachten betrug 0,33 mSv. Bei der Beurteilung dieses Mittelwertes ist jedoch zu beachten, daß bei ca. 85 % aller Überwachten während des ganzen Jahres die untere Meßbereichsgrenze des Personendosimeters von 0,2 mSv nicht überschritten wird. In diesen Fällen stellen die Meßstellen einen Personendosiswert Null fest, was im Bereich Medizin auf etwa 90 %, in nichtmedizinischen Bereichen auf etwa 70 % der Überwachten zutrifft. Bei den verbleibenden Personen ergibt sich eine ausgeprägte Häufigkeit kleiner Dosiswerte. Bildet man einen Mittelwert nur für die Überwachten mit von Null verschiedenen Jahres-Personendosiswerten, so ergibt sich eine mittlere Jahres-Personendosis von 2,1 mSv.

Die Summe der Jahresdosiswerte aller Überwachten (Kollektivdosis) betrug im Berichtsjahr 101 Personen-Sv. Die Beiträge typischer Tätigkeitszweige zur Kollektivdosis zeigt Abbildung 2. Die auffallende Verringerung der Kollektivdosis ab 1984 wird überwiegend auf die Beendigung besonderer Umrüstungs- und Prüfungsmaßnahmen (im Zeitraum 1979 bis 1983) in Kernkraftwerken sowie auf eine weitere Optimierung des Strahlenschutzes zurückgeführt. Das Verhältnis der Kollektivdosis der in Kernkraftwerken tätigen Personen und der in diesen Anlagen erzeugten elektrischen Energie gibt Tabelle 12 wieder.

Personen, bei denen aufgrund ihres Umgangs mit offenen radioaktiven Stoffen eine Inkorporation nicht ausgeschlossen werden kann, werden durch Messungen im Ganzkörperzähler oder durch Untersuchungen der Ausscheidungen überwacht. Die Zahl dieser Personen betrug weniger als 10 % der mit Personendosimetern überwachten Personen. Bei weniger als 1 % dieses Personenkreises wurde eine Inkorporation von mehr als 5 % des Grenzwertes der zulässigen Jahresaktivitätszufuhr festgestellt. Der Beitrag der Strahlenexposition durch inkorporierte radioaktive Stoffe zur gesamten beruflichen Strahlenexposition war daher vergleichsweise gering.

5. Besondere Vorkommnisse

Eine Übersicht über besondere Vorkommnisse beim Umgang mit radioaktiven Stoffen und Betrieb von Beschleunigern im Jahr 1989, die dem Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit von den zuständigen Landesbehörden gemeldet worden sind, enthält Tabelle 13. Die Vorkommnisse im Zusammenhang mit Ionisationsrauchmeldern sind gesondert zusammengestellt (Tabelle 14). Diese Zusammenstellungen sollen dazu dienen, mögliche Fehlerquellen beim Umgang mit radioaktiven Stoffen oder ionisierender Strahlung bekanntzumachen und dadurch die Strahlenschutzverantwortlichen, die Strahlenschutzbeauftragten, die beruflich mit ionisierenden Strahlen bzw. radioaktiven Stoffen Umgehenden und die vor Ort tätigen Aufsichtsbehörden für ihren Bereich in die Lage zu versetzen, vergleichbare Vorkommnisse zu vermeiden.

6. Fall-out von Kernwaffenversuchen

1989 wurden 27 unterirdische Kernwaffenversuche durchgeführt. Aus diesen unterirdischen Versuchen resultiert keine zusätzliche Strahlenexposition des Menschen in der Bundesrepublik Deutschland.

Der allgemeine Pegel der Umweltradioaktivität durch die früheren Kernwaffenversuche in der Atmosphäre ist in den letzten 20 Jahren ständig zurückgegangen. Die langlebigen Fall-out-Radionuklide sind im menschlichen Körper aber noch immer nachweisbar. Ihr Beitrag an der gesamten Strahlenexposition des Menschen ist gering (weniger als 0,25 %).

IV. Strahlenexposition durch den Unfall im Kernkraftwerk Tschernobyl

In der Nacht vom 25. zum 26. April 1986 ereignete sich in Block 4 des Kernkraftwerks Tschernobyl in der Ukraine/UdSSR ein Unfall, in dessen Folge eine größere Menge radioaktiver Stoffe in die Atmosphäre freigesetzt wurde. Diese Stoffe wurden auf dem Weg der atmosphärischen Verfrachtung über große Teile Europas verteilt. Bedingt durch regional differierende Wettersituationen traten stark unterschiedliche Aktivitätskonzentrationen in der Luft sowie durch Ablagerung in anderen Umweltbereichen und den Lebensmitteln auf.

Das infolge des Reaktorunfalls deponierte Caesium 134 und Caesium 137 verursachte 1989 in der Bundesrepublik Deutschland eine externe Strahlenexposition, die im Mittel zu einer effektiven Dosis von 0,02 mSv führte (Tabelle 1). Diese Dosis schwankt regional abhängig von etwa 0,01 mSv/a bis 0,2 mSv/a bei Erwachsenen, bei Kleinkindern kann sie wegen der geringeren Organabschirmung und der kleineren Distanz des Körpers zum Boden bis zu 0,3 mSv/a betragen.

Die mittlere monatliche Caesiumzufuhr über Grundnahrungsmittel ging 1989 auf unter 100 Bq pro Monat zurück. In speziellen Lebensmitteln (Wildfleisch, Waldpilze) aus eng begrenzten Gebieten sind auch 1989 teilweise höhere Caesiumwerte aufgetreten; besondere Ernährungsweisen können daher Abweichungen von den durchschnittlichen Zufuhrwerten bedingen.

Seit dem Reaktorunfall in Tschernobyl wird von einer Reihe von Ganzkörpermeßeinrichtungen in der Bundesrepublik Deutschland in verschiedenen Gebieten der zeitliche Verlauf des Caesium 134- und Caesium 137-Gehaltes im Menschen verfolgt. Über die Ergebnisse wurde regelmäßig in Vierteljahresberichten des Bundesministers für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit über Umweltradioaktivität und Strahlenbelastung berichtet. Im Verlauf des Jahres 1989 sind die spezifischen Körperaktivitäten bei allen Personengruppen auf ca. 15% des Maximalwertes, der um die Jahresmitte 1987 auftrat, zurückgegangen. Für einige Personengruppen, wie Kinder oder Erwachsene aus Norddeutschland, sind unter Standardmeßbedingungen die Nachweisgrenzen erreicht worden. Die aus der Inkorporation von Caesium 134 und Caesium 137, einschließlich des Beitrages der durch den Reaktorunfall bedingten Zufuhr von Strontium 90, berechnete mittlere jährliche effektive Dosis beträgt 0,01 mSv. Gegenüber dem Jahr 1988 haben die Dosen weiter abgenommen, regionale Unterschiede haben sich weiter abgeschwächt.

Die mittlere effektive Dosis der Bevölkerung der Bundesrepublik Deutschland durch den Reaktorunfall hat 1989 im bundesweiten Mittel ca. 1 bis 2% der durchschnittlichen natürlichen Strahlenexposition von 2,4 mSv pro Jahr betragen. Mit einer leicht abnehmenden Tendenz der Strahlenexposition infolge des radioaktiven Zerfalls des Caesiums und dessen Transportes in tiefere Bodenschichten ist auch weiterhin zu rechnen.

V. Strahlendosis und Strahlenwirkung

(Quelle: Veröffentlichungen der Strahlenschutzkommission, Band 14)

1. Strahlendosis und ihre Einheiten

Beim radioaktiven Zerfall von instabilen Nukliden werden energiereiche Teilchen emittiert. Bei Radionukliden, die aus kerntechnischen Anlagen freigesetzt werden, sind dies vor allem Alpha- und Beta-Teilchen sowie die Photonen der Gamma-Strahlung. Durch Photoeffekt, Comptoneffekt und Paarbildung erzeugen Photonen im bestrahlten Material energiereiche Elektronen und Positronen. Beim Durchgang der elektrisch geladenen Teilchen (Alpha- und Beta-Teilchen, Elektronen und Positronen) durch Materie wird die kinetische Energie der Teilchen diskontinuierlich in vielen Teilbeträgen auf die Materie übertragen. Es kommt dabei zur Ionisation und Anregung von Atomen und Molekülen und als deren Folge zur Radikalbildung. Die Dichte dieser Ionisations- und Anregungsereignisse längs der Teilchenbahn hängt

von Strahlenart und Strahlenenergie ab. Man unterscheidet daher locker ionisierende Strahlungen (z. B. Beta- und Gamma-Strahlung) und dicht ionisierende Strahlung (z. B. Alpha-Teilchen). Die in Wasser als Referenzmaterial längs eines kurzen Teilstücks der Teilchenbahn durch Ionisation und Anregung auf die Materie übertragene Energie, dividiert durch die Länge dieses Wegstückes, wird als linearer Energietransfer (LET) bezeichnet.

Da Ionisations- und Anregungsprozesse zu molekularen Veränderungen führen, die den Ausgangspunkt für die Entwicklung biologischer Strahlenwirkungen bilden, bezieht sich der für ionisierende Strahlungen geltende Dosisbegriff auf die Energiedeposition in Materie durch Ionisation und Anregung. Die Energiedosis ist definiert als die in einem kleinen Volumenelement auf die Materie übertragene Energie, dividiert durch die Masse in diesem Volumenelement. Die

verwendete Dosiseneinheit ist das Gray (Gy), es entspricht einer Energieabsorption von einem Joule pro Kilogramm, z. B. einem Kilogramm Gewebe. Früher wurde für die Energiedosis das Rad (rd) als Dosiseneinheit benutzt; 1 Gy ist gleich 100 rd. Zur quantitativen Dosisangabe bei strahlenbiologischen Dosiswirkungsbeziehungen dient die Energiedosis.

Schon relativ frühzeitig wurde allerdings erkannt, daß das Ausmaß einer biologischen Strahlenwirkung nicht allein von der Energiedosis abhängt. Beim Vergleich verschiedener Strahlenarten miteinander zeigte sich, daß ionisierende Strahlen mit hohem LET (dicht ionisierende Strahlen, z. B. Alpha-Teilchen) wesentlich wirksamer sein können als ionisierende Strahlen mit niedrigem LET (locker ionisierende Strahlen, z. B. Beta- und Gamma-Strahlung) bei gleicher Energiedosis. Dies gilt für die einzelnen biologischen Effekte in unterschiedlichem Maße. Für die Abschätzung von Strahlenrisiken, für Grenzwertfestlegungen und für Strahlenschutzmessungen erschien es daher notwendig, neben der Energiedosis auch die Strahlenqualität, d. h. die Strahlenart und -energie, zu berücksichtigen. Der lineare Energietransfer gilt vereinbarungsgemäß als physikalische Kenngröße der Strahlenqualität. Er kennzeichnet die vom Dosisbegriff nicht erfaßte Konzentration der auf die Materie übertragenen Energie längs der Teilchenbahnen.

Aus diesen Gründen ist neben der Energiedosis D die Äquivalentdosis H für Strahlenschutz Zwecke eingeführt worden. Die Äquivalentdosis ergibt sich aus der gemessenen oder berechneten Energiedosis durch Multiplikation mit einem von der Strahlenqualität abhängigen Bewertungsfaktor Q .

$$H = Q \cdot D.$$

Der Bewertungsfaktor Q berücksichtigt die Unterschiede des biologischen Risikos bei den verschiedenen Strahlenqualitäten.

Zur Festlegung der Bewertungsfaktoren für die einzelnen Strahlenqualitäten sind experimentelle biologische Daten und klinische Erfahrungen zusammengefaßt beurteilt worden. Um einen exakten Vergleich der biologischen Wirkungen bei verschiedenen Strahlenqualitäten vorzunehmen, wird zunächst die relative biologische Wirksamkeit (RBW) bestimmt. Die RBW ist definiert als der Quotient aus der Energiedosis einer Referenzstrahlung (D_{Ref}) und der Energiedosis der zu untersuchenden Strahlenqualität (D_{Test}), wobei in den Quotienten diejenigen Strahlendosen eingesetzt werden, die das gleiche Ausmaß der untersuchten biologischen Wirkung herbeiführen.

$$\text{RBW} = \frac{D_{\text{Ref}}}{D_{\text{Test}}} \quad (\text{bei gleicher biologischer Wirkung})$$

Die Untersuchung der relativen biologischen Wirksamkeit hat ergeben, daß die resultierenden RBW-Werte nicht nur von der Strahlenqualität abhängig sind, sondern auch von dem gemessenen biologischen Endpunkt (z. B. Zelltod, Tumorbildung usw.), sowie von der Strahlendosis und anderen Faktoren. Ein biologisch exakt gemessener RBW-Wert gilt daher nur für sehr gut definierte experimentelle Bedingungen. Unter verschiedenen Bedingungen können bei ge-

benen Strahlenqualität auch unterschiedliche RBW-Werte resultieren.

Für den praktischen Strahlenschutz sind aus diesen Gründen die gemessenen RBW-Werte nicht unmittelbar verwendbar, sondern man hat auf der Grundlage der experimentellen RBW-Werte für die einzelnen Strahlenqualitäten Bewertungsfaktoren Q zur Ermittlung der Äquivalentdosis festgelegt. Sie beziehen sich ebenso wie die RBW-Werte auf harte Röntgenstrahlung als Referenzstrahlung. Die Zahlenwerte der Bewertungsfaktoren orientieren sich aus Sicherheitsgründen am oberen Wertebereich der experimentell erhaltenen RBW-Werte für die jeweilige Strahlenqualität. Nach der Strahlenschutzverordnung gilt für die Berechnung der Äquivalentdosis der in Anlage XIV der Verordnung angegebene LET-abhängige Bewertungsfaktor $Q(L)$, der je nach Strahlenqualität Werte zwischen 1 und 20 besitzt. Ist das LET-Spektrum nicht genau bekannt, so darf näherungsweise der Bewertungsfaktor 1 für Beta- und Gamma-Strahlung, der Bewertungsfaktor 10 für Neutronen und der Bewertungsfaktor 20 für Alpha-Teilchen verwendet werden.

Die Einheit für die Äquivalentdosis ist heute das Sievert (Sv), früher wurde die Äquivalentdosis in Rem (rem) angegeben. Es gilt $1 \text{ Sv} = 100 \text{ rem}$. Beispiel: $D = 0,1 \text{ mGy}$; $Q = 20$; $H = 2 \text{ mSv}$.

2. Externe und interne Bestrahlung

Bei einer Bestrahlung von außen (die Strahlenquelle befindet sich außerhalb des Organismus, externe Bestrahlung) ist die Eindringtiefe der verschiedenen Strahlenqualitäten in das menschliche Gewebe sehr unterschiedlich. Gamma-Strahlung hat wie Röntgenstrahlung die Fähigkeit, den gesamten Körper zu durchdringen und ihn mit geschwächter Intensität wieder zu verlassen, während Alpha- und Beta-Teilchen relativ zu den Körperdimensionen nur eine geringe Eindringtiefe besitzen. Bei Alpha-Strahlung ist die Eindringtiefe so gering, daß nur die äußere Zellschicht der Haut betroffen ist. Die Keimschicht der Haut (stratum germinativum), in der die Zellerneuerung stattfindet, liegt bei äußerer Alpha-Bestrahlung bereits außerhalb der Reichweite der Alpha-Teilchen. Bei Beta-Strahlung liegt die Eindringtiefe im Gewebe im Bereich von einigen Millimetern, so daß es bei einer Bestrahlung von außen bei relativ hohen Strahlendosen beispielsweise zu Hautschäden und Schäden der Augenlinse, aber nicht zu Schäden in tiefer gelegenen Geweben kommen kann. Bei niedrigen Strahlendosen ist die Bestrahlung durch Alpha- und Beta-Strahlung von außen für das Strahlenrisiko ohne Bedeutung.

Radionuklide, bei deren Zerfall Alpha- bzw. Beta-Strahlung entsteht, sind jedoch dann für das Strahlenrisiko relevant, wenn sie mit der Nahrung, dem Trinkwasser oder durch Atmung dem Körper zugeführt werden und die Bestrahlung von innen erfolgt. Zur Bestimmung der Strahlendosis ist es bei einer Inkorporation der radioaktiven Stoffe notwendig, die Verteilung der Radionuklide und ihre Verweildauer im

Organismus und in einzelnen Organen sowie Geweben genau zu kennen. Die Biokinetik, die sich vor allem aus dem Stoffwechselverhalten und anderen biologischen Vorgängen ergibt, muß bei der Dosisabschätzung für die Strahlenexposition von innen berücksichtigt werden. Neben zahlreichen, u. a. altersabhängigen biokinetischen Parametern gehen in die Dosisermittlung die physikalischen Eigenschaften der Strahlung und die physikalischen Halbwertszeiten der Radionuklide ein.

Radionuklide mit einer langen physikalischen Halbwertszeit und einer zusätzlich langen Verweildauer (lange biologische Halbwertszeit) im Organismus tragen nach einer Inkorporation über eine entsprechend lange Zeit zur Strahlendosis bei. Daher wird bei der Berechnung der Strahlendosis nach Inkorporation derartiger Radionuklide die 50-Jahre-Folgedosis (70-Jahre-Folgedosis bei Kindern) ermittelt. Das bedeutet, daß bei der Festlegung des Dosisfaktors die Dosisleistung (Strahlendosis in einem Zeitintervall, dividiert durch dieses Zeitintervall) über die auf die Inkorporation folgenden 50 Jahre (bzw. 70 Jahre) integriert (aufsummiert) wird. Unter diesen Prämissen sind Dosisfaktoren für die verschiedenen Inkorporationswege (z. B. Ingestion und Inhalation) sowie für verschiedene chemische Formen der inkorporierten Radionuklide (z. B. löslich und unlöslich) abgeschätzt worden.

Die Aktivität einer radioaktiven Substanz ist die Anzahl der spontanen Kernumwandlungen in einem kurzen Zeitintervall, dividiert durch dieses Zeitintervall. Sie wird in Becquerel (Bq) angegeben. Die Anzahl der Becquerel bezeichnet die Anzahl der spontanen Kernumwandlungen je Sekunde. Die frühere Einheit ist das Curie (Ci). 1 Ci ist gleich $3,7 \cdot 10^{10}$ Bq. Kenngröße für die Exposition von innen ist der Dosisfaktor, d. h. der Quotient aus der in einem bestimmten Gewebe oder Organ erzeugten Äquivalentdosis und der dem Körper zugeführten Aktivität eines bestimmten Radionuklids, gemessen in Sievert pro Becquerel (Sv/Bq). Durch Multiplikation des Dosisfaktors mit der Aktivität des aufgenommenen Radionuklids wird die Äquivalentdosis errechnet.

Die Konzentration der Ionisations- und Anregungsprozesse ionisierender Teilchen auf den Nahbereich der Teilchenbahnen (s. Kennzeichnung der Strahlenqualität durch den linearen Energietransfer) hat bei mikroskopischer Betrachtungsweise auch die Bedeutung einer von Zelle zu Zelle statistisch variierenden Anzahl der Teilchendurchgänge; die Energiedosis gibt nur den räumlichen Mittelwert der massebezogenen Energiedeposition an. Bei einer Energiedosis von 10 mGy erfährt z. B. nur einer unter ca. 40 Zellkernen des Querschnitts $60 \mu\text{m}^2$ den Durchgang eines Alpha-Teilchens der Anfangsenergie 5 MeV. Erst bei wesentlich höheren Dosen — für Alpha-Teilchen bei etwa 50 mGy — kommt es ebensooft vor, daß ein Zellkern von einem bzw. von zwei oder mehr Alpha-Teilchen getroffen wird, aber auch bei dieser Dosis ereignet sich in etwa 30% aller Zellkerne kein Teilchendurchgang. Bei locker ionisierender Strahlung erfahren in diesem Dosisbereich bereits alle Zellkerne eine annähernd gleiche Anzahl von Teilchendurchgängen.

Mit abnehmender Dosis kommt man also in einen Bereich, in dem nicht mehr alle, sondern nur noch einzelne Zellen und Zellkerne (Durchmesser des Kernes einer menschlichen Zelle: etwa $8 \mu\text{m}$) von einem Teilchendurchgang betroffen werden. Die Zahl der dann noch getroffenen Zellkerne nimmt bei weiterer Erniedrigung der Strahlendosis proportional zu dieser ab. Der Dosisbereich, in dem diese inhomogene Verteilung der Teilchendurchgänge aufzutreten beginnt, ist von der Strahlenqualität abhängig. Bei Strahlung mit niedrigem LET liegt er tiefer als bei Strahlung mit hohem LET. So tritt dieses Phänomen bei Röntgen- und Gamma-Strahlung im Dosisbereich unterhalb etwa 3 mGy und bei 14 MeV Neutronen unterhalb etwa 50 mGy auf. Bei Alpha-Strahlung (z. B. nach Zerfall von Pu 239) erstreckt sich der Bereich der vereinzelt Teilchendurchgänge zu noch höheren Dosen. Bei inkorporierten Radionukliden, die an Partikel (Aerosole) gebunden sind oder in Zellen durch Phagozytose akkumuliert sind, kann in der unmittelbaren Nachbarschaft eine zusätzliche Inhomogenität der mikroskopischen Dosisverteilung auftreten. Diese Bedingungen sind bei Radionukliden, die bei ihrem Zerfall Alpha-Teilchen emittieren, von besonderer Relevanz (hot particles).

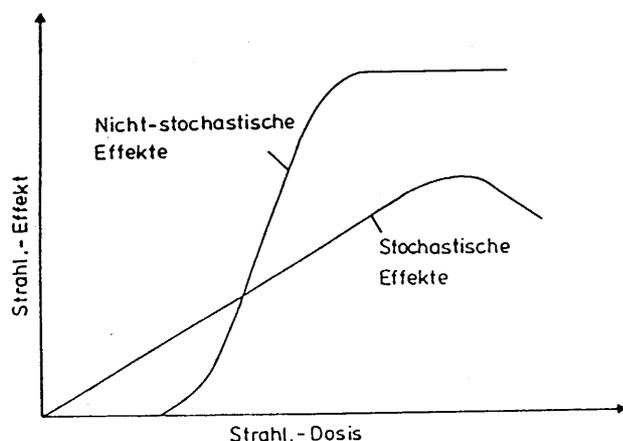
3. Stochastische und nicht-stochastische Strahlenwirkung

Im Strahlenschutz werden stochastische und nicht-stochastische Strahlenwirkungen unterschieden. Beide Kategorien von Schadenstypen haben grundsätzlich verschiedene Dosiswirkungsbeziehungen. Bei den nicht-stochastischen Strahlenwirkungen muß zunächst eine Schwellendosis überschritten werden, bevor die beschriebenen Effekte induziert werden können (Abbildung 1). Oberhalb der Schwellendosis steigt die Zahl der Effekte und der Schweregrad des Effektes mit steigender Dosis an. Der Entwicklung dieser Strahlenschäden liegt ein multizellulärer Mechanismus zugrunde. Es müssen viele Zellen geschädigt werden, damit es zu einer Manifestation derartiger Effekte kommt. Zu diesen Strahlenwirkungen zählen alle akuten Strahleneffekte, die Linsentrübung (Katarakt) und die Entwicklung von fibrotischen Prozessen in verschiedenen Geweben.

Bei einem zweiten Typ von Strahlenwirkungen, den stochastischen Effekten, wird davon ausgegangen, daß keine Schwellendosis besteht und daß die Wahrscheinlichkeit des Eintretens mit steigender Strahlendosis zunimmt. Auch bei kleinen Strahlendosen können also noch Wirkungen auftreten, wenn auch mit geringerer Wahrscheinlichkeit als bei höheren Dosen (Abbildung 1). Für den Strahlenschutz sind die stochastischen Strahlenwirkungen daher von entscheidender Bedeutung. Ihr Auftreten unterliegt einer Zufallsverteilung, d. h. in einem Kollektiv gleich exponierter Personen werden sie mit einer durch den statistischen Erwartungswert nur angenähert voraussagbaren Häufigkeit beobachtet. Als „Risiko“ wird im Strahlenschutz die Wahrscheinlichkeit des Auftretens einer stochastischen Strahlenwirkung bei der Einzelperson bezeichnet; den Quotienten Risiko/Äquivalentdosis nennt man „Risikoeffizient“.

Abbildung 1

**Schematische Darstellung
der Dosiswirkungsbeziehungen für stochastische
und nicht-stochastische Effekte**



Zu dieser Kategorie von Strahlenwirkungen zählen die Induktion von vererbaren Defekten und von malignen Erkrankungen (Leukämie und Krebs). Man geht davon aus, daß es sich hier um unizelluläre Prozesse handelt. Bei den vererbaren Defekten muß nur eine Keimzelle geschädigt werden, damit es nach deren Beteiligung an einer erfolgreichen Befruchtung zu einer Mutation in der Folgegeneration kommt. Bei der Induktion von Leukämie und Krebs wird angenommen, daß die maligne Transformation einer Zelle ausreichend ist, um eine derartige Erkrankung zu verursachen. Man geht also davon aus, daß Leukämie oder Krebs mit einer gewissen Wahrscheinlichkeit durch eine einzige maligne transformierte Zelle hervorgerufen werden kann (monoklonales Wachstum).

4. Genetisch vererbare Defekte

Beim Menschen sind bisher keine genetischen Mutationen durch ionisierende Strahlen beobachtet worden, die zu einer quantitativen Abschätzung des genetischen Strahlenrisikos führen können. Auch bei Untersuchungen von Nachkommen der Überlebenden nach den Atombombenabwürfen in Hiroshima und Nagasaki sind bisher derartige Effekte nicht statistisch signifikant nachgewiesen worden. Man hat in diesem Zusammenhang bei der Untersuchung von mehr als 70 000 Kindern, deren Väter oder Mütter bzw. beide Elternteile bei den Atombombenabwürfen in Hiroshima und Nagasaki exponiert worden sind, lediglich einen angedeuteten, statistisch nicht ausreichend gesicherten Trend zu erhöhten Raten an genetischen Mutationen festgestellt.

Die quantitative Abschätzung des Strahlenrisikos beruht daher auf tierexperimentellen Untersuchungen, die vor allem an Mäusen durchgeführt worden sind. Bei diesen Untersuchungen werden lokale Bestrahlungen der Gonaden vorgenommen und nach Möglichkeit leicht diagnostizierbare Merkmale, wie die

Fellfarbe, Form der Ohren, Form des Schwanzes, die Bildung von Katarakten usw., analysiert. Diesen Veränderungen liegen dominante, aber auch rezessive Mutationen zugrunde. Es werden sehr häufig lineare Dosiswirkungsbeziehungen für diese Effekte ermittelt, so daß aus der Steigung derartiger Dosiswirkungsbeziehungen die Mutationsrate pro Gray bzw. Sievert errechnet werden kann.

Die Versuchsergebnisse an Mäusen sind in überwiegenderem Maße nach Strahlendosen im Bereich von 1 Gy und höher gewonnen worden, im allgemeinen hat eine Bestrahlung mit hoher Dosisleistung stattgefunden. Um diese Versuchsergebnisse für die Abschätzung des Strahlenrisikos beim Menschen verwenden zu können, sind zwei Annahmen notwendig:

1. Bei locker ionisierenden Strahlen und relativ kleinen Dosen und Dosisleistungen besteht zwischen Dosis und Zahl der induzierten Mutationen eine lineare Dosiswirkungsbeziehung ohne Schwellenwert. Diese Form der Dosiswirkungsbeziehung ist bereits bei den stochastischen Strahlenwirkungen besprochen worden.
2. Die Mutationshäufigkeit in Keimzellen des Menschen und der Maus ist nach identischen Bestrahlungsbedingungen und Strahlendosen etwa gleich groß.

Aufgrund der vorhandenen Erkenntnisse über den Wirkungsmechanismus ionisierender Strahlung und der Entstehung der Mutationen in Keimzellen, die zu vererbaren Defekten führen, steht es in der wissenschaftlichen Diskussion heute weitgehend außer Zweifel, daß eine Dosiswirkungsbeziehung ohne Schwellendosis existiert und damit auch bei niedrigen Dosen und niedriger Dosisleistung mit entsprechend geringer Wahrscheinlichkeit Mutationen auftreten können. Es ist gezeigt worden, daß bei einer chronischen Bestrahlung über 300 Tage mit Gamma-Strahlen und einer Dosisleistung von 0,01 Gy pro Tag, ebenso wie nach einer fraktionierten Bestrahlung von 0,1 Gy pro Tag über 60 Tage, Mutationen bei Mäusen induziert werden können.

5. Induktion von Leukämie und Krebs

Während für die Abschätzung des genetischen Strahlenrisikos keine ausreichenden Erfahrungen beim Menschen vorliegen, kann man für die Abschätzung des Leukämie- und Krebsrisikos auf eine Vielzahl von Daten aus epidemiologischen Untersuchungen beim Menschen zurückgreifen. In Betracht kommen hierfür vor allem Untersuchungen an

- Überlebenden nach den Atombombenabwürfen in Hiroshima und Nagasaki,
- Personen nach beruflichen Strahlenexpositionen,
- Patienten mit medizinischen Strahlenexpositionen.

Da eine strahlenbedingte maligne Erkrankung sich nicht von einer „spontanen“ malignen Erkrankung

unterscheidet, können Leukämie oder Krebs im Einzelfall nicht allein aufgrund ihrer Erscheinungsform oder ihres klinischen Verlaufes als strahlenbedingte Erkrankung erkannt werden. Nur epidemiologisch-statistische Untersuchungen können dazu beitragen, quantitative Daten für die Risikoabschätzung beim Menschen zu erhalten. Strahlenexponierte Personengruppen müssen dabei nicht-exponierten Personengruppen gegenübergestellt werden. Dann kann erkannt werden, ob und in welchem Ausmaß die Raten an Leukämie und Krebs nach Bestrahlung in der exponierten Gruppe erhöht sind. Auch hier ist auf individueller Basis eine qualitative Unterscheidung hinsichtlich der Frage, ob der Krebs strahlenbedingt ist oder nicht, nicht möglich. Es kann lediglich die Wahrscheinlichkeit ermittelt werden, mit der eine individuelle Krebserkrankung durch die vorausgegangene Bestrahlung verursacht ist.

Erschwert werden diese Untersuchungen dadurch, daß die Erkrankungen mit einer erheblichen Latenzzeit (fünf bis zehn Jahre bei Leukämie und mehrere Jahrzehnte bei Krebs) auftreten können und damit analytisch, z. B. hinsichtlich der Anamnese, schwerer zugänglich werden. Da Leukämie mit einer relativ kurzen Latenzzeit nach einer Bestrahlung und mit einem besonders hohen relativen Risiko beobachtet werden, liegen für diese Erkrankungen verhältnismäßig umfangreiche Daten vor.

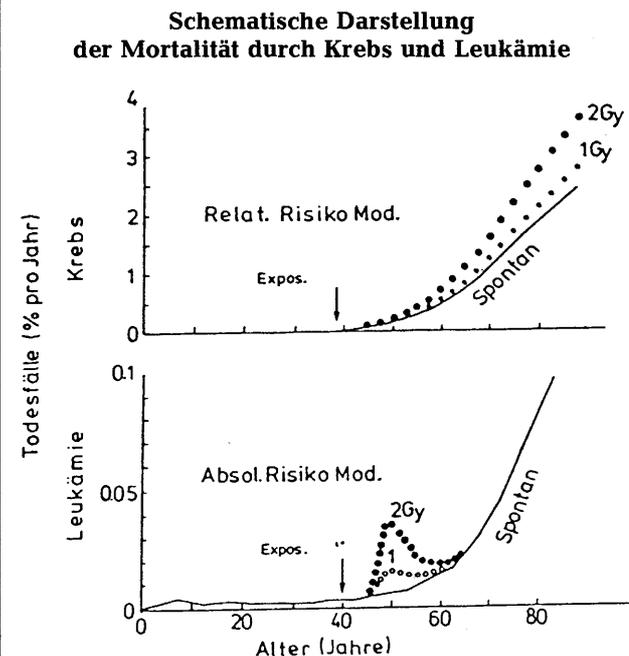
Es wird beobachtet, daß vor allem myeloische Leukämien (akute und chronische Erscheinungsformen), aber auch akute lymphatische Leukämien, nach Bestrahlung vermehrt auftreten. Dagegen sind chronisch-lymphatische Leukämien nicht erhöht beobachtet worden. Die Untersuchungen an den Überlebenden in Hiroshima und Nagasaki, aber auch bei Patientengruppen, wie z. B. nach Bestrahlung wegen Morbus Bechterew, ergeben für die Gesamtpopulation, daß nach Strahlendosen im Bereich von 0,5 Sv und höher mit einer signifikanten Erhöhung der Leukämierate zu rechnen ist. Strahlendosen, die unter diesem Bereich liegen, haben bei epidemiologischen Untersuchungen von Gruppen der Gesamtbevölkerung nicht zu einer statistisch signifikant erhöhten Leukämierate geführt.

Nach unserem heutigen Verständnis bedeutet dieses nicht, daß geringere Strahlendosen als 0,5 Sv keine Leukämien hervorrufen können. Die Zahl der Fälle wird jedoch dann so klein, daß andere Faktoren wie Lebensgewohnheiten, genetische Prädispositionen usw., die das Krebs- und Leukämierisiko beeinflussen, mit ihrer Variabilität das strahlenbedingte Risiko überlagern, so daß letzteres sich aus den Schwankungen der „spontanen“ Leukämie- und Krebsrate nicht mehr heraushebt. Bei den Überlebenden in Hiroshima und Nagasaki ist das Leukämierisiko nach einer Strahlendosis von 4 Gy etwa um den Faktor 15 erhöht. Dagegen ist das Risiko für alle Krebsformen außer Leukämien bei der gleichen Strahlendosis nur etwa um den Faktor 2 angestiegen. Dieser Zuwachsfaktor wird als „relatives Risiko“ bezeichnet; die „spontanen“ Raten an Leukämie und Krebs (Raten ohne Bestrahlung) entsprechen einem relativen Risiko von 1,0.

6. Risikoabschätzung

Für die Risikoabschätzung wird außer bei Leukämie und Knochentumoren von einem sogenannten relativen Risikomodell ausgegangen. Für Leukämien und Knochentumoren dagegen wird das absolute Risikomodell zur Risikoabschätzung eingesetzt. Bei dem letzteren Risikomodell geht man davon aus, daß nach einer Latenzzeit die Rate an Erkrankungen über der „spontanen“ Rate liegt, nach einer weiteren Periode aber keine zusätzlichen strahlenbedingten Erkrankungen auftreten (Abbildung 2). Offensichtlich haben sich dann alle strahlenbedingten Erkrankungen manifestiert. Beim relativen Risikomodell liegt die Rate an malignen Erkrankungen in der bestrahlten Personengruppe ebenfalls nach einer Latenzzeit über der „spontanen“ Rate, aber diese Erhöhung bleibt bis zum Lebensende erhalten. Das „relative Risiko“, d. h. die relative Zunahme der strahlenbedingten Rate im Vergleich zur „spontanen“ Rate, wird dabei als über die Lebenszeit konstant angenommen (Abbildung 2). Das bedeutet, daß auch die strahlenbedingten Tumoren vorwiegend erst in einem Alter beobachtet werden, in dem die „spontanen“ Tumoren ohne Bestrahlung manifest werden. Die Abschätzung des strahlenbedingten Krebsrisikos auf der Basis des relativen Risikomodells stellt eine maximale Risikoabschätzung dar.

Abbildung 2



Die durchgezogenen Kurven geben die „spontane“ Mortalität durch diese Erkrankungen an. Die gepunkteten Kurven geben die Mortalität nach Strahlenexposition entsprechend dem „Relativen Risikomodell“ und dem „Absoluten Risikomodell“ an.

Die vielfältigen epidemiologischen Untersuchungen haben ergeben, daß eine statistisch signifikante und damit zahlenmäßig bestimmbare Erhöhung maligner

Erkrankungen im allgemeinen erst im Dosisbereich von einigen Zehnteln bis einem Sievert eintritt. In niedrigeren Dosisbereichen, die für die berufliche Strahlenexposition (einige mSv/a bis einige 10 mSv/a) und vor allem für Expositionen der Bevölkerung etwa in der Umgebung kerntechnischer Anlagen (einige 10 μ Sv/a) von Bedeutung sind, müssen daher die Strahlenrisiken durch rechnerische Extrapolation, ausgehend von diesen höheren Strahlendosen, ermittelt werden. Ferner sind die statistisch signifikanten epidemiologischen Daten der Leukämie- und Krebs-erhöhung nicht nur nach Exposition mit hohen Strahlendosen, sondern häufig auch nach Bestrahlung mit hoher Dosisleistung erhalten worden. Da die Exposition am Arbeitsplatz und in noch stärkerem Maße in der Umwelt bei niedriger Dosisleistung stattfindet, ergeben sich hier zusätzliche Schwierigkeiten bei der Extrapolation zur Ermittlung der Risikokoeffizienten.

Für die Extrapolation wird angenommen, daß eine Schwellendosis nicht existiert und daß die Dosiswirkungsbeziehung für die Eintrittswahrscheinlichkeit stochastischer Effekte auch in diesem niedrigen Dosisbereich linear mit der Strahlendosis verläuft. Aufgrund unserer wissenschaftlichen Kenntnisse ist eine solche Annahme für den Strahlenschutz sinnvoll, der Beweis dafür steht aber noch aus. Um der niedrigen Dosisleistung im niedrigen Dosisbereich Rechnung zu tragen, werden für den Risikokoeffizienten häufig Reduktionsfaktoren von 2 bis 3 eingesetzt. Für die Induktion von Leukämie und Krebs hat sich in einer Reihe von Fällen ergeben, daß sowohl eine lineare als auch eine linear-quadratische Dosiswirkungsbeziehung angenommen werden kann. Für die Zwecke des Strahlenschutzes wird jedoch häufig der Einfachheit halber und um Unterschätzungen auszuschließen, eine lineare Dosiswirkungskurve zugrunde gelegt.

Unter dieser Annahme ist eine Risikoabschätzung durch Extrapolation, ausgehend von den Daten bei hohen Strahlendosen, zu geringen Strahlendosen hin möglich. Es ergeben sich dann Risikokoeffizienten, die im Bereich von 200 bis 1 000 Todesfällen durch Leukämie und Krebs nach Ganzkörperexposition einer Million Menschen mit 10 mSv (1 rem) liegen (Risikokoeffizient: $2 \cdot 10^{-2} \text{ Sv}^{-1}$ bis $1 \cdot 10^{-1}$ pro Sv). Bei Berücksichtigung dieses Bereiches des Risikokoeffizienten ergibt eine Strahlendosis von 10 mSv eine Erhöhung der Leukämie- und Krebstodesrate, die im Bereich von einem bis einigen Promille der „spontanen“ Leukämie- und Krebstodesrate unserer Bevölkerung liegt. Die Exposition der Bevölkerung in der Umgebung kerntechnischer Anlagen der Bundesrepublik Deutschland liegt beim bestimmungsgemäßen Betrieb einschließlich von Auslegungsfällen im Bereich von einigen 10 μ Sv. Es müssen also Extrapolationen über mehrere Größenordnungen der Dosis (etwa um den Faktor 10^4) vorgenommen werden, um von dem Dosisbereich mit epidemiologisch ermittelten Daten in den Dosisbereich dieser Exposition zu kommen.

Wiederholte Berichte, daß die Zahl der Leukämieerkrankungen bei Kindern in der Umgebung von Kernkraftwerken der Bundesrepublik Deutschland erhöht sei, sind bisher mit epidemiologischen Methoden,

d. h. bei Berücksichtigung der statistischen Schwankungen der Fallzahlen, nicht bestätigt worden. Allerdings sind in Großbritannien in der Umgebung von Wiederaufarbeitungsanlagen erhöhte Raten an Leukämien bei Kindern beobachtet und in verschiedenen Studien berichtet worden. Trotz erheblicher statistischer Schätzfehler aufgrund der geringen Fallzahl stellt man dort eine höhere Zahl der Leukämieerkrankungen fest, als man für diese Bevölkerung statistisch erwarten würde. Die Strahlenexposition der Bevölkerung ist jedoch so gering, daß durch sie diese Erhöhung nicht erklärt werden kann.

Die Breite des Schätzintervalls für den Risikokoeffizienten spiegelt die in den Abschätzungen liegenden Ungenauigkeit nur bedingt wider. Sie ergibt sich u. a. daraus, daß die neueren Untersuchungen an den Überlebenden der Atombombenabwürfe in Japan zu höheren Risikofaktoren führen. Die höheren Risikofaktoren bei der japanischen Population ergeben sich aus drei Gründen:

1. Neue Rechnungen zur Dosimetrie nach den Atombombenexplosionen haben zu neuen Dosisabschätzungen geführt.
2. In den letzten Jahren sind neue Daten zu den Leukämie- und Krebsraten erhoben worden. Es sind vor allem neue Erkrankungen bzw. Todesfälle bei den im jungen Alter exponierten Personen beobachtet worden.
3. Diese Befunde haben zu dem Konzept des relativen Risikos geführt. Damit wird das Strahlenrisiko für die noch lebenden exponierten Personen in die Zukunft projiziert. Die noch zu erwartenden Krebstodesfälle werden mit Hilfe der Altersabhängigkeit des Krebsrisikos nicht exponierter Personen unter Annahme eines zeitlich konstanten strahlenbedingten relativen Risikos ermittelt.

Während der erste Umstand den Risikokoeffizienten nicht erheblich beeinflusst hat, tragen die Gründe 2 und 3 in erheblichem Maße zur Erhöhung bei. Der Risikokoeffizient liegt dann etwa um den Faktor 3 bis 5 höher, als früher angenommen.

7. Effektive Äquivalentdosis

Für die Erfassung des Gesamtstrahlenrisikos bei kleinen Dosen ist die sogenannte effektive Äquivalentdosis eingeführt worden. Sie enthält Bewertungsfaktoren zur Berücksichtigung des gesamten stochastischen Strahlenrisikos und bezieht infolgedessen sowohl die vererbaren Defekte als auch die Induktion von Leukämie und Krebs ein. Aufgrund der unterschiedlichen Strahlenempfindlichkeiten in einzelnen Geweben und Organsystemen für die Induktion maligner Erkrankungen sind von der Internationalen Strahlenschutzkommission (ICRP) Bewertungsfaktoren (Wichtungsfaktoren) für die verschiedenen Gewebe und Organe festgelegt worden. Die Summe aller Wichtungsfaktoren beträgt 1,0. Zur Ermittlung der effektiven Äquivalentdosis werden die Äquivalentdosen in den einzelnen Organen und Geweben mit den Wichtungsfaktoren multipliziert und die so erhaltenen Produkte addiert. Ein erheblicher Vorteil der effekti-

ven Äquivalentdosis liegt darin, daß das Strahlenrisiko auch bei einer inhomogenen Bestrahlung, z. B. einer selektiven Strahlenexposition einzelner Organe nach Inkorporation radioaktiver Stoffe, bewertet werden kann.

Kritisch eingewendet wird, daß die Wichtungsfaktoren auf das Mortalitätsrisiko und nicht auf das Morbiditätsrisiko durch Leukämie und Krebs abstellen. Für einzelne Organe, z. B. die Schilddrüse, bei denen die Therapie der betreffenden Tumoren gute Erfolge erzielt, würden die Wichtungsfaktoren für die Morbidität größer als für die Mortalität sein. Für Organe und Gewebe mit ungünstiger Therapieprognose der Tumoren wäre diese Situation umgekehrt. Allerdings würde auch bei Berücksichtigung des Morbiditätsrisikos definitionsgemäß die Summe aller Wichtungsfaktoren 1,0 betragen. Der Risikoeffizient insgesamt (Morbiditätsrate pro Dosis) würde jedoch höher als bei der Berücksichtigung der Mortalitätsraten liegen. Orientiert man die Dosisgrenzwerte für beruflich strahlenexponierte Personen und das damit verbun-

dene Strahlenrisiko am Risiko anderer Berufe, so erhält man strengere Maßstäbe für die Dosisgrenzwerte, wenn man das Mortalitätsrisiko zugrunde legt.

Es wird ferner eingewendet, daß die Wichtungsfaktoren für einzelne Gewebe und Organe aufgrund neuerer epidemiologischer Daten verändert werden müssen. Da die Summe der Wichtungsfaktoren gleich 1,0 ist, ergibt sich bei einer homogenen Ganzkörperbestrahlung, daß die Ganzkörperdosis mit der effektiven Äquivalentdosis identisch ist. Bei einer inhomogenen Bestrahlung, bei der einige Organe bzw. Gewebe besonders hoch belastet werden, schlagen dagegen diese hohen lokalen Bestrahlungen auf die effektive Dosis besonders durch. Dieses trifft u. a. auch für die natürliche Strahlenexposition zu, da in diesem Falle die Lunge und die Epithelien der Bronchien eine besonders hohe Strahlenexposition durch das Radon und seine radioaktiven Folgeprodukte erhalten. Die effektive Äquivalentdosis wird heute anstelle der Ganzkörperdosis zur Angabe der Dosisgrenzwerte in Gesetzen, Verordnungen und Empfehlungen verwendet.

Erläuterung der benutzten Fachausdrücke

Aerosol	Gase mit festen oder flüssigen Schwebeteilchen
Aktivität	Anzahl der je Sekunde zerfallenden Atomkerne eines radioaktiven Stoffes
Alphastrahler	Radionuklide, die Alphateilchen (Heliumatomkerne) aussenden
Äquivalentdosis	Produkt aus Energiedosis und einem u. a. von der Strahlenart abhängigen Bewertungsfaktor. Die Äquivalentdosis ist das Maß für die Wirkung einer ionisierenden Strahlung auf den Menschen
Becquerel	SI-Einheit der Aktivität. Die Aktivität von 1 Becquerel (Bq) liegt vor, wenn 1 Atomkern je Sekunde zerfällt. 1 Becquerel (Bq) = $2,7 \cdot 10^{-11}$ Curie
Betastrahlung	Teilchenstrahlung, die aus beim radioaktiven Zerfall von Atomkernen ausgesandten Elektronen besteht
Betasubmersion	Strahlenexposition durch Betastrahlung von radioaktiven Stoffen in der Atmosphäre
Curie	Alte Einheit der Aktivität. Die Aktivität von 1 Curie (Ci) liegt vor, wenn 37 Mrd. Atomkerne je Sekunde zerfallen. 1 Curie (Ci) = $3,7 \cdot 10^{10}$ Becquerel
Dekontamination	Beseitigung oder Verminderung von radioaktiven Verunreinigungen
Dosis	Siehe Energiedosis und Äquivalentdosis
Effektive Dosis	Summe der gewichteten mittleren Äquivalentdosen in den einzelnen Organen und Geweben des Körpers. Der Wichtungsfaktor bestimmt sich aus den relativen Beiträgen der einzelnen Organe und Gewebe zum gesamten Strahlenrisiko des Menschen bei Ganzkörperbestrahlung
Energiedosis	Quotient aus der Energie, die durch ionisierende Strahlung auf das Material in einem Volumenelement übertragen wird, und der Masse in diesem Volumenelement
Fall-out	Aus der Atmosphäre auf die Erde in Form kleinster Teilchen abgelagertes radioaktives Material, das zum Beispiel bei Kernwaffenversuchen entstanden ist
Gammastrahlung	Energiereiche elektromagnetische Strahlung, die bei der radioaktiven Umwandlung von Atomkernen oder bei Kernreaktionen auftreten kann
Gammasubmersion	Strahlenexposition durch Gammastrahlung von radioaktiven Gasen in der Atmosphäre
Ganzkörperdosis	Mittelwert der Äquivalentdosis über Kopf, Rumpf, Oberarme und Oberschenkel als Folge einer als homogen angesehenen Bestrahlung des ganzen Körpers
Genetisch signifikante Dosis	Mittlere jährliche Keimdrüsendosis pro Person in einer Bevölkerung, gewichtet für jede Einzelperson mit der Wahrscheinlichkeit der Kindeserwartung nach der Strahlenexposition
Gray	SI-Einheit der Energiedosis. 1 Gray (Gy) = 100 Rad
Ingestion	Allgemein: Nahrungsaufnahme Speziell: Aufnahme von radioaktiven Stoffen mit der Nahrung
Inhalation	Allgemein: Einatmung von Gasen Speziell: Aufnahme von radioaktiven Stoffen mit der Atemluft
Inkorporation	Allgemein: Aufnahme in den Körper Speziell: Aufnahme radioaktiver Stoffe in den menschlichen Körper
Ionisierende Strahlen	Elektromagnetische- oder Teilchenstrahlen, welche die Bildung von Ionen bewirken können (z. B. Alphastrahlen, Betastrahlen, Gammastrahlen, Röntgenstrahlen)
Isotop	Abart eines chemischen Elements mit gleichen chemischen Eigenschaften (gleicher Ordnungszahl), aber verschiedener Massenzahl
Keimdrüsendosis	Mittelwert der Äquivalentdosis über die Keimdrüsen
Kontamination	Verunreinigung mit radioaktiven Stoffen

Kosmische Strahlung	Sehr energiereiche Strahlung aus dem Weltraum
Median	Siehe Zentralwert
Nuklearmedizin	Anwendung radioaktiver Stoffe in der Medizin zu diagnostischen und therapeutischen Zwecken
Nuklid	Durch Protonenzahl (Ordnungszahl) und Massenzahl charakterisierte Atomart
Organdosis	Mittelwert der Äquivalentdosis über ein Organ
Ortsdosis	Äquivalentdosis für Weichteilgewebe, gemessen an einem bestimmten Ort
Ortsdosisleistung	In einem kurzen Zeitintervall erzeugte Ortsdosis, geteilt durch die Länge des Zeitintervalls
Rad	Alte Einheit der Energiedosis. 1 Rad (rd) = 10 Milligray
Radioaktive Stoffe	Stoffe, die Radionuklide enthalten
Radioaktivität	Eigenschaft bestimmter chemischer Elemente bzw. Nuklide, ohne äußere Einwirkung Teilchen- oder Gammastrahlung aus dem Atomkern auszusenden
Radiographiegerät	Gerät zur zerstörungsfreien Durchstrahlungsprüfung von Materialien mittels Radionukliden
Radioiod	Radioaktive Iodisotope
Radionuklide	Instabile Nuklide, die unter Aussendung von Strahlung in andere Nuklide zerfallen
Rem	Alte Einheit der Äquivalentdosis. 1 Rem (rem) = 10 Millisievert
Röntgen	Alte Einheit der Ionendosis. 1 Röntgen (R) = 258 $\mu\text{C}/\text{kg}$
SI-Einheiten	Einheiten des Internationalen Einheitensystems (SI). Die Anwendung der Einheiten im Strahlenschutzmeßwesen ist durch die Ausführungsverordnung zum Gesetz über Einheiten im Meßwesen vom 13. Dezember 1985 (BGBl. I S. 2272) geregelt
Sievert	SI-Einheit der Äquivalentdosis. 1 Sievert (Sv) = 100 Rem, 1 Sievert = 1 000 Millisievert = 1 000 000 Mikrosievert
Somatisches Strahlenrisiko	Risiko der körperlichen Schädigung der von der Bestrahlung betroffenen Person, zur Unterscheidung vom genetischen Risiko, das für die Schädigung der Folgegenerationen besteht
Stochastisch	Zufallsabhängig
Strahlenbelastung	Siehe Strahlenexposition
Strahlenexposition	Einwirkung ionisierender Strahlen auf den menschlichen Körper oder seine Teile
Terrestrische Strahlung	Strahlung der natürlich radioaktiven Stoffe, die überall auf der Erde vorhanden sind
Tritium	Radioaktives Isotop des Wasserstoffs, das Betastrahlung sehr niedriger Energie aussendet
Zentralwert	Mittelwert, unterhalb dessen ebensoviel kleinere Werte wie oberhalb größere Werte liegen

Tabelle 1

**Mittlere effektive Dosis der Bevölkerung der Bundesrepublik Deutschland
im Jahr 1989**

	Mittlere effektive Dosis mSv
1. Natürliche Strahlenexposition	
1.1 durch kosmische Strahlung	ca. 0,3
1.2 durch terrestrische Strahlung von außen im Mittel	ca. 0,5
bei Aufenthalt im Freien	ca. 0,43
bei Aufenthalt in Gebäuden	ca. 0,57
1.3 durch Inhalation von Radon in Wohnungen im Mittel	ca. 1,3
1.4 durch inkorporierte natürliche radioaktive Stoffe	ca. 0,3
Summe der natürlichen Strahlenexposition	ca. <u>2,4</u>
2. Zivilisatorische Strahlenexposition	
2.1 durch kerntechnische Anlagen	< 0,01
2.2 durch Anwendung radioaktiver Stoffe und ionisierender Strahlen in der Medizin	ca. 1,5 *)
2.3 durch Anwendung radioaktiver Stoffe und ionisierender Strahlung in For- schung, Technik und Haushalt (ohne 2.4)	< 0,02
2.3.1 Industrieerzeugnisse	< 0,01
2.3.2 technische Strahlenquellen	< 0,01
2.3.3 Störstrahler	< 0,01
2.4 durch berufliche Strahlenexposition (Beitrag zur mittleren Strahlenexposition der Bevölkerung)	< 0,01
2.5 durch besondere Vorkommnisse	0
2.6 durch Fall-out von Kernwaffenversuchen	< 0,01
2.6.1 von außen im Freien	< 0,01
2.6.2 durch inkorporierte radioaktive Stoffe	< 0,01
Summe der zivilisatorischen Strahlenexposition	ca. <u>1,55</u>
3. Strahlenexposition durch den Unfall im Kernkraftwerk Tschernobyl im Mittel	
3.1 von außen	ca. 0,02
3.2 durch inkorporierte radioaktive Stoffe	ca. 0,01
Summe der Strahlenexpositionen durch den Unfall im Kernkraftwerk Tschernobyl	ca. <u>0,03</u>

*) Der Schwankungsbereich dieses Wertes beträgt ca. 50 %.

Tabelle 2

Abgabe radioaktiver Stoffe mit der Abluft aus Kernkraftwerken im Jahr 1989

Kernkraftwerk	Edelgase Bq	Aerosole ^{a)} Bq	Iod 131 Bq	¹⁴ CO ₂ Bq	Tritium Bq
Kahl ^{b)}	—	2,7 E04	—	—	—
Gundremmingen A ^{c)}	—	5,2 E06	—	—	3,5 E09
Lingen ^{c)}	—	1,3 E02	—	—	1,3 E08
Obrigheim	6,5 E11	1,3 E07	n. n.	9,1 E09	1,6 E11
Stade	9,9 E12	5,2 E07	3,3 E07	1,9 E10	8,2 E11
Würgassen	1,4 E12	2,8 E08	3,0 E08	1,7 E11	9,2 E11
Biblis A	2,8 E12	6,2 E07	2,1 E07	1,7 E10	6,4 E11
Biblis B	6,9 E11	1,5 E07	n. n.	2,9 E10	3,3 E11
Neckarwestheim 1	1,6 E13	4,4 E06	1,2 E07	5,7 E10	6,7 E11
Brunsbüttel	7,9 E12	5,2 E07	7,6 E07	2,8 E11	1,4 E11
Isar 1	3,6 E11	8,5 E06	8,3 E06	4,0 E11	4,1 E11
Unterweser	3,7 E12	1,4 E06	3,0 E06	3,3 E10	7,6 E11
Philippsburg 1	1,0 E10	1,3 E07	6,3 E06	3,5 E11	6,9 E10
Grafenrheinfeld	1,4 E13	9,6 E05	1,1 E07	2,3 E11	4,7 E11
Krümmler	1,0 E12	5,4 E06	8,0 E07	7,7 E10	1,0 E11
Gundremmingen B und C	1,5 E13	n. n.	1,2 E07	9,4 E11	2,2 E11
Grohnde	3,8 E12	8,8 E05	8,2 E06	8,8 E10	4,5 E11
Hamm-Uentrop	3,1 E11	9,1 E06	n. n.	8,9 E09	3,0 E12
Philippsburg 2	3,1 E12	1,1 E06	6,5 E05	7,1 E10	1,1 E12
Mülheim-Kärlich	5,3 E06	n. n.	n. n.	7,4 E09	3,0 E11
Brokdorf	2,8 E11	4,8 E04	n. n.	1,8 E11	1,4 E11
Isar 2	3,8 E10	4,8 E04	n. n.	3,8 E11	4,3 E11
Emsland	9,4 E10	3,2 E05	n. n.	1,0 E11	4,8 E11
Neckarwestheim 2	2,6 E12	9,2 E03	n. n.	3,6 E10	3,3 E11

^{a)} Halbwertszeit > 8 Tage, ohne Iod 131, einschließlich Strontium und Alpha-Strahler.

^{b)} Stillstand seit November 1985.

^{c)} Stillstand seit Januar 1977.

n. n.: nicht nachgewiesen (kleiner oder gleich Nachweisgrenze).

6,5 E11 bedeutet $6,5 \cdot 10^{11}$.

**Abgabe radioaktiver Stoffe mit dem Abwasser aus Kernkraftwerken in der Bundesrepublik Deutschland
im Jahr 1989**
(Summenwerte, Tritium und α -Strahler)

Kernkraftwerk	Spalt- und Aktivierungsprodukte (außer Tritium) Bq	Tritium Bq	Alpha-Strahler Bq
Siedewasserreaktoren			
Kahl ^{a)}	1,2 E08	5,4 E08	—
Würgassen	9,6 E08	9,6 E11	3,5 E06
Brunsbüttel	3,5 E08	2,7 E11	2,0 E05
Isar 1	2,7 E08	5,1 E11	2,7 E06
Philippsburg 1	4,4 E08	4,8 E11	—
Krümmel	2,2 E07	6,9 E11	—
Gundremmingen ^{b)} (Block B und C)	2,2 E08	1,5 E12	—
Druckwasserreaktoren			
Obrigheim	4,1 E08	4,4 E12	—
Stade	5,6 E08	4,6 E12	—
Biblis A	7,8 E08	1,3 E13	1,8 E05
Biblis B	4,8 E08	1,2 E13	6,2 E04
Neckarwestheim 1	5,3 E07	1,0 E13	9,4 E04
Unterweser	2,3 E08	1,5 E13	—
Grafenrheinfeld	6,8 E07	1,4 E13	—
Grohnde	2,5 E08	1,3 E13	8,0 E05
Philippsburg 2	2,9 E08	2,1 E13	—
Mülheim-Kärlich	3,8 E08	1,7 E12	—
Brokdorf	—	1,3 E13	—
Isar 2	2,0 E07	7,1 E12	—
Emsland	1,3 E07	1,3 E13	—
Neckarwestheim 2	1,7 E07	7,8 E12	—
Hochtemperaturreaktor			
Hamm-Uentrop	2,3 E07	2,2 E10	—

^{a)} Anlage stillgelegt.

^{b)} Block A stillgelegt (geringfügige Abgaben sind in den für Block B und C angegebenen Daten enthalten).

Wird kein Zahlenwert angegeben, liegt die Aktivitätsabgabe unterhalb der Nachweisgrenze.

Tabelle 4

Abgabe radioaktiver Stoffe mit der Abluft aus Kernforschungszentren im Jahr 1989

Kernforschungszentrum	Edelgase Bq	Aerosole Bq	Iod 131 Bq	Iod 129 Bq	Tritium Bq	Kohlenstoff 14 Bq	Strontium 90 Bq
Kernforschungszentrum Karlsruhe (einschließlich Wiederaufarbeitungsanlage)	7,7 E14	2,4 E08 ^{a)}	1,5 E07	8,4 E07	1,0 E13	4,5 E10	1,3 E06
Kernforschungsanlage Jülich (einschließlich Versuchsreaktor AVR)	3,7 E12	<1,7 E07	6,9 E07	—	3,7 E12	3,8 E11	9,4 E04

^{a)} Alpha-Strahler: 5,8 E06 Bq.

Abgabe radioaktiver Stoffe mit dem Abwasser aus Kernforschungszentren in der Bundesrepublik Deutschland im Jahr 1989

Kernforschungszentrum	Spalt- und Aktivierungsprodukte (außer Tritium) Bq	Tritium Bq	α-Strahler Bq
Karlsruhe (einschließlich Wiederaufarbeitungsanlage) ...	3,7 E08	5,8 E13	1,5 E07
Jülich	1,0 E09	8,4 E11	<3,0 E07

Tabelle 5

Abgabe radioaktiver Stoffe (Alpha-Aktivität) aus kernbrennstoffverarbeitenden Betrieben in der Bundesrepublik Deutschland im Jahr 1989

Betrieb	Abluft Bq	Abwasser Bq
NUKEM GmbH Hanau	2,1 E04	} 3,5 E07
HOBEG GmbH Hanau	1,6 E04	
SIEMENS AG Brennelementewerk Hanau		
— Betriebsteil MOX-Verarbeitung ^{a)} ...	< 1,8 E04	1,5 E06
— Betriebsteil Uran-Verarbeitung ^{b)} ...	4,6 E07	1,8 E09
— Betriebsteil Sonderfertigung Karlstein ^{c)}	< 1,0 E05	7,0 E07
ANF GmbH (Lingen)	< 1,2 E04	< 1,0 E06
URENCO D (Gronau)	2,6 E04	3,8 E04

^{a)} Vormalig ALKEM GmbH.

^{b)} Vormalig RBU Werk I.

^{c)} Vormalig RBU Werk II.

Kerntechnische Anlagen im benachbarten Ausland
(Stand: 31. Dezember 1989)

Land	Anlage/Standort	Entfernung zur deutschen Grenze
Schweiz	Kernkraftwerk Beznau (2 Blöcke)	ca. 6 km
	Paul Scherrer Institut Villigen/Würenlingen ^{a)}	ca. 7 km
	Kernkraftwerk Mühleberg	ca. 70 km
	Kernkraftwerk Gösgen-Däniken	ca. 20 km
	Kernkraftwerk Leibstadt	ca. 0,5 km
Frankreich	Kernkraftwerk Fessenheim (2 Blöcke)	ca. 1,5 km
	Kernkraftwerk Cattenom (2 Blöcke)	ca. 12 km
Niederlande	Kernkraftwerk Dodewaard	ca. 20 km
	Urananreicherungsanlage Almelo	ca. 15 km

^{a)} Vormalig Eidg. Institut für Reaktorforschung.

Tabelle 7

Strahlenexposition im Jahr 1989 in der Umgebung von Kernkraftwerken durch die Abgabe radioaktiver Stoffe mit der Abluft

(Nach der Strahlenschutzverordnung darf die effektive Dosis hierbei höchstens 300 Mikrosievert und die Schilddrüsendosis höchstens 900 Mikrosievert pro Jahr betragen)

Kernkraftwerk	Oberer Wert ^{a)}	
	der effektiven Dosis für Erwachsene µSv	der Schilddrüsendosis für Kleinkinder µSv
Kahl	< 0,1	< 0,1
Lingen	< 0,1	< 0,1
Obrigheim	1	3
Stade	0,2	0,4
Würgassen	4	15
Biblis A, B	0,3	0,7
Neckarwestheim 1, 2	1	2
Brunsbüttel	1	3
Isar 1, 2	2	4
Unterweser	0,1	0,2
Philippsburg 1, 2	2	4
Grafenrheinfeld	0,4	1
Krümmel	0,2	0,7
Gundremmingen A, B, C	2	4
Grohnde	0,4	1
Hamm-Uentrop	< 0,1	< 0,1
Mülheim-Kärlich	< 0,1	< 0,1
Brokdorf	0,6	1
Emsland	0,1	0,3

^{a)} Berechnet für die ungünstigste Einwirkungsstelle.

Tabelle 8

Strahlenexposition im Jahr 1989 in der Umgebung von Kernkraftwerken durch die Abgabe radioaktiver Stoffe mit dem Abwasser

(Nach der Strahlenschutzverordnung darf die effektive Dosis hierbei höchstens 300 µSv pro Jahr betragen)

Kernkraftwerk	Oberer Wert	
	der effektiven Dosis für Erwachsene ^{a)} µSv	
Kahl	0,3	
Gundremmingen A, B und C	0,3	
Obrigheim	0,2	
Stade	< 0,1	
Würgassen	0,3	
Biblis A und B	0,1	
Neckarwestheim 1 und 2	0,3	
Brunsbüttel	< 0,1	
Isar 1 und 2	0,1	
Unterweser	< 0,1	
Philippsburg 1 und 2	0,1	
Grafenrheinfeld	0,2	
Krümmel	< 0,1	
Grohnde	0,1	
Hamm-Uentrop	< 0,1	
Mülheim-Kärlich	< 0,1	
Brokdorf	< 0,1	
Emsland	0,5	

^{a)} Es werden extreme Verzehrsgewohnheiten (z. B. 39 kg Flußfisch pro Jahr, der in der Kühlwasserfahne gefangen wird) und Lebensgewohnheiten zugrunde gelegt.

Tabelle 9

Strahlenexposition im Jahr 1989 in der Umgebung von Kernforschungszentren durch die Abgabe radioaktiver Stoffe mit der Abluft^{a)}

(Nach der Strahlenschutzverordnung darf die effektive Dosis hierbei höchstens 300 Mikrosievert und die Schilddrüsendosis höchstens 900 Mikrosievert pro Jahr betragen)

Kernforschungszentrum	Oberer Wert	
	der effektiven Dosis für Erwachsene µSv	der Schilddrüsendosis für Kleinkinder µSv
Kernforschungszentrum Karlsruhe (einschließlich Wiederaufarbeitungsanlage)	1,5	64
Kernforschungsanlage Jülich (einschließlich Versuchsreaktor AVR) ..	8,9	12,6

^{a)} Entnommen den Jahresberichten 1989 sowie nach Angaben der Strahlenschutzabteilungen der Kernforschungszentren Karlsruhe und Jülich.

Tabelle 10

Strahlenexposition im Jahr 1989 in der Umgebung der kernbrennstoffverarbeitenden Betriebe durch die Abgabe radioaktiver Stoffe mit der Abluft

(Nach der Strahlenschutzverordnung darf die effektive Dosis höchstens 300 µSv und die Lungendosis höchstens 900 µSv pro Jahr betragen)

Betrieb	Oberer Wert	
	der effektiven Dosis für Erwachsene µSv	der Lungendosis für Kleinkinder µSv
NUKEM GmbH Hanau	< 0,1	0,2
HOBEG GmbH Hanau	< 0,1	< 0,1
SIEMENS AG Brennelementwerk Hanau		
Betriebsteil MOX-Verarbeitung ^{a)}	< 0,1	< 0,1
Betriebsteil Uran-Verarbeitung ^{b)}	2	15
Betriebsteil Sonderfertigung Karlstein ^{c)}	< 0,1	< 0,6
ANF (Lingen)	< 0,1	< 0,1
URENCO D (Gronau)	< 0,1	< 0,1

a) Vormalis ALKEM GmbH.

b) Vormalis RBU Werk I.

c) Vormalis RBU Werk II.

Tabelle 11

Strahlenexposition im Jahr 1989 in der Umgebung der kernbrennstoffverarbeitenden Betriebe durch die Abgabe radioaktiver Stoffe mit dem Abwasser

(Nach der Strahlenschutzverordnung darf die effektive Dosis höchstens 300 µSv pro Jahr betragen)

Betrieb	Oberer Wert der effektiven Dosis für Erwachsene µSv
NUKEM GmbH Hanau (einschließlich HOBEG)	< 0,1
SIEMENS AG Brennelementwerk Hanau	
Betriebsteil MOX-Verarbeitung ^{a)}	< 0,1
Betriebsteil Uran-Verarbeitung ^{b)}	0,6
Betriebsteil Sonderfertigung Karlstein ^{c)}	< 0,1
ANF (Lingen)	—
URENCO D (Gronau)	< 0,1

a) Vormalis ALKEM GmbH.

b) Vormalis RBU Werk I.

c) Vormalis RBU Werk II.

Tabelle 12

Daten zur beruflichen Strahlenexposition in Leistungskernkraftwerken

Jahr	Anzahl Kraftwerke	Überwachte Personen	Kollektivdosis in Sv	Elektrische Energieerzeugung in GWh	Verhältnis Kollektivdosis/Energieerzeugung in mSv/GWh
1980	10	13 822	51	43 345	1,2
1981	11	18 105	62	53 081	1,2
1982	11	21 458	87	62 976	1,4
1983	12	21 203	78	64 329	1,2
1984	15	19 617	43	92 252	0,5
1985	16	22 343	49	125 709	0,4
1986	16	24 607	50	124 465	0,4
1987	17	22 949	46	123 333	0,4
1988	20	30 823	54	145 275	0,4
1989	21	33 032	53	149 453	0,4

Tabelle 13

Besondere Vorkommnisse beim Umgang mit radioaktiven Stoffen und Beschleunigern

Datum	Vorkommnis	Ursache	radiologische Folgen	Beurteilung der radiol. Folgen/Bemerkungen
1	2	3	4	5
24. 3. 1987 Nachtrag	Verkehrsunfall eines Lastzuges mit radioaktiven Stoffen	Fahrfehler	Keine, Versandstücke mit radioaktiven Stoffen wurden nicht beschädigt	
23. 8. 1987 Nachtrag	Verlust zweier Versandstücke mit 592 kBq Te 201 und 250 kBq P 32	Irrläufer	Wegen geringer Aktivität und Beschaffenheit der Strahler nicht zu erwarten	
29. 10. 1987 Nachtrag	Fund von 2 Beuteln mit radiumhaltigem Antiphlogistikum „Neothermoman“	im Sperrmüll aufgefunden	keine	
Nov./Dez. 1987 Nachtrag	Erhöhte Dosisleistung bei Versandstücken mit Mo 99/Tc 99 – Generatoren	Konstruktionsfehler	Geringe zusätzliche Strahlenexposition des Entladungspersonals	Konstruktionsfehler wurde Ende Dezember 1987 behoben
23. 1. 1988 Nachtrag	Inhalation von U02 bei 3 Arbeitern und Kontamination der Fertigungshalle nach Maschinenstörung an einer Presse in einer kerntechnischen Einrichtung	technische Störung	Aktivitätszufuhr unter 5% der maximal zulässigen Jahresaktivitätszufuhr, Kontamination der Halle	Kapselung der Pressen
29. 1. 1988 Nachtrag	Verschlußstörung an einer medizinischen Gamma-Bestrahlungsanlage	Undichtheit im Druckluftventil des Verschlußantriebs	keine	Defekt wurde rechtzeitig erkannt
25. 4. 1988 Nachtrag	Fund einer Mo 99/Tc 99 Generatorabschirmung	nicht zu ermitteln (Abschirmung mehr als 5 Jahre alt)	Bei ordnungsgemäßer Entsorgung der Säule keine	Verbleib der Generatorsäule nicht zu ermitteln. Müßte aufgrund ihres Alters von 5 Jahren weitestgehend abgeklungen sein
27. 6. 1988 Nachtrag	Verletzung der Hand durch Anlaufen eines Mischers bei Überprüfungsarbeiten in kerntechnischer Einrichtung	nicht gesicherter Schlüsselschalter des Mischers und Herabfallen der Deckelsicherung des Mischers, die ein Anlaufen verhindern soll	Plutonium-Inkorporation im Bereich der Wunden	Wunden wurden operativ dekontaminiert, Dekorporation durch Infusion mit Komplexbildner. Überschreiten des Grenzwertes der Jahresdosis nicht zu erwarten
10. 8. 1988 Nachtrag	Abgabe eines umschlossenen Ra 226 Prüfstrahlers in Bundeswehrekaserne	Fund in einem Abschirmbehälter	Keine, da Strahler noch dicht und geringe Ortsdosisleistung	

noch Tabelle 13

Besondere Vorkommnisse beim Umgang mit radioaktiven Stoffen und Beschleunigern

Datum	Vorkommnis	Ursache	radiologische Folgen	Beurteilung der radiol. Folgen/Bemerkungen
1	2	3	4	5
September 1988 Nachtrag	In einer Klinik gelangten 0,5 Liter einer Flüssigkeit mit max. 1,44 GBq ⁹⁰ Y in die öffentliche Kanalisation	Behandlung eines Patienten mit rad. Stoffen außerhalb der dafür zuständigen Station, nicht ordnungsgemäß belehrtes Pflegepersonal	Keine, wegen der kurzen Halbwertszeit und der Verteilung der Aktivität	Therapien mit offenen radioaktiven Stoffen werden nur noch auf einer Station mit Umgangsgenehmigung durchgeführt
10. 9. 1988 Nachtrag	Sicherstellung eines Ra 226-Strahlers (5 MBq)	Präparat war von Schülern in den Physikunterricht mitgebracht worden	Nicht zu erwarten, Körperdosis laut Abschätzung 27 µSv	
8. 12. 1988 Nachtrag	Verkehrsunfall eines LKW der amerik. Streitkräfte mit radioaktivem Versandstück	Fahrfehler	Keine, Versandstück wurde nicht beschädigt	
17. 1. 1989	An einer medizinischen Gamma-Bestrahlungseinrichtung konnte der Strahler nicht in die Ruhestellung gebracht werden	Die Rückholfeder war gebrochen und der Federhaltebolzen hatte sich verhakt	Exposition des Personals unter Nachweisgrenze, Patientin erhielt ungefähr 2% der Therapie-dosis	Instandsetzung durch Hersteller
19. 1. 1989	Verschlußstörung an einer medizinischen Gamma-Bestrahlungseinrichtung	Gebrochenes Kugellager führte dazu, daß der Schieber nicht vollständig schloß	Keine, da Strahlenquelle bereits hinreichend abgeschirmt war	Instandsetzung durch Hersteller
23. 1. 1989	Verlust eines Caesium 137-Prüfstrahlers (300 kBq) für die Kalibrierung von Stabdosisimetern	Bei Umbauarbeiten vermutlich in Bauschutt gelandet	Keine zu erwarten, da Strahler auf Deponie und geringe Aktivität	
26. 1. 1989	Verlust eines chemischen Kampfstoffdetektors der US-Army mit rad. Strahler	nicht bekannt	Keine, das Gerät wurde einige Tage später wiedergefunden	
27. 2. 1989	Freisetzung von Tritium in einem Raum, in dem mit Tritium-Lichtquellen umgegangen wird	1. Leicht kontaminierter Sicherheits-transportbehälter; 2. Tritiumaustritt durch Haarriß an einer Tritium-Lichtquelle	Keine, Inkorporationsmeßwerte nahe der Nachweisgrenze	Raum bis Überprüfung geräumt, gesperrt und belüftet; Gerät mit Tritium-Lichtquelle wurde gasdicht verpackt

noch Tabelle 13

Besondere Vorkommnisse beim Umgang mit radioaktiven Stoffen und Beschleunigern

Datum	Vorkommnis	Ursache	radiologische Folgen	Beurteilung der radiol. Folgen/Bemerkungen
1	2	3	4	5
1. 3. 1989	Die Dosimeter von 7 Pflegern in einem Krankenhaus zeigten Dosiswerte zwischen 16 und 152 mSv	Ein 370 MBq Radium 226-Strahler war in den Aufenthaltsraum der Pfleger gelangt. Die Ursache für die Verbringung des Strahlers aus der zuständigen Abteilung war nicht mehr aufzuklären	Die Dosimeter lagen längere Zeit auf dem Tisch im Aufenthaltsraum. Anhand des Abstandes und der Aufenthaltsdauer wurde eine Ersatzdosis von 2 mSv für die Pfleger festgesetzt	Organisatorische Verbesserungen vorgenommen
1. 3. 1989	Energie der Photonenstrahlung an einem med. Linearbeschleuniger weicht von eingestelltem Wert ab	Fehlerhafte interne Ansteuerung	Keine, in der fraglichen Zeit wurden keine Patienten mit der fehlerhaften Einstellung bestrahlt	Instandsetzung durch Hersteller, Überprüfung durch Hersteller
28. 3. 1989	Verlust einer Sendung von 925 kBq Iod 125	vermutlich Falschlieferung	Aufgrund von Beschaffenheit und Halbwertszeit nicht zu erwarten	Wegen Wiederholungsfall führt zuständige Behörde weitere Ermittlungen bei befördernder Firma durch
5. 4. 1989	Kontaminationsereignis bei der Abfallbehandlung in einer kerntechnischen Einrichtung	Beschädigte Umhüllung eines Paketes mit radioaktiven Abfällen	Inkorporation von α -Strahlern (U, Pu, Am) von weniger als 5% des Jahresgrenzwertes bei einem Mitarbeiter	Verbesserte Vorrichtung für die Abfallbehandlung vorgesehen
11. 4. 1989	Verschlußstörung an einer medizinischen Bestrahlungseinrichtung	Die Lagerung der Antriebswelle des Verschlußgerätes war verschlissen	Der die Patientin bergende Physiker erhielt eine sehr geringe Dosis (<0,4 mSv). Exposition der Patientin wird bei Therapie berücksichtigt	Erneuerung des Verschlußgetriebes
12. 4. 1989	Beim Umladen von radioaktiven Abfällen gelangte 0,1 Liter C 14-Lösung ins Hafenwasser	Durch ein heftiges Kranmanöver beim Umladen fielen 2 · 25 l Entsorgungsgefäße ins Wasser	Keine, die freigesetzte Aktivität liegt unter der Freigrenze	
21. 4. 1989	Verlust eines Prüfstrahlers für Dosimeter (Am 241, 62,8 kBq) innerhalb des Kontrollbereiches eines Kernkraftwerkes	Präparate wurden nicht, wie vorgesehen, unverzüglich eingeschlossen	Nicht zu erwarten, geringe Aktivität; Strahler befindet sich sehr wahrscheinlich noch im Kontrollbereich	Organisatorische Verbesserungen

Besondere Vorkommnisse beim Umgang mit radioaktiven Stoffen und Beschleunigern

Datum	Vorkommnis	Ursache	radiologische Folgen	Beurteilung der radiol. Folgen/Bemerkungen
1	2	3	4	5
26. 4. 1989	Fund eines Strahlengerätes für die zerstörungsfreie Werkstoffprüfung durch einen Schrottsammler	Das Gerät war nach Ausmusterung zum Schrott gelangt	Keine, da Gerät ohne Strahler abgegeben wurde, wie die Ermittlungen ergaben	Die Bevölkerung wurde vorsorglich gewarnt, da zunächst keine Erkenntnisse über den Verbleib des Strahlers vorlagen; behördliche Ermittlung gegen Genehmigungsinhaber noch nicht abgeschlossen
31. 5. 1989	Überschreitung des eingestellten Dosiswertes bei einem medizinischen Linearbeschleuniger	Ausfall der bestimmungsgemäßen Abschaltvorrichtungen, Abschalten durch Sicherheitsvorrichtung	Bei 3 Patienten kam es zu einer Überschreitung der jeweils vorgesehenen Teildosis, die bei der weiteren Behandlung berücksichtigt wird	
26. 6. 1989	Verkehrsunfall eines Fahrzeuges, das ein radioaktives Versandstück befördert	Massenunfall im Nebel	Keine, Versandstück blieb unverseht	
5. 7. 1989	Freisetzung von Tritium in der Reaktorhalle eines Forschungsreaktors	Wechsel von Ventilmembranen im Schwerwasser-Raum	Anstieg der Tritium-Konzentration, Räumung der Reaktorhalle; Grenzwerte der Raumluftkonzentration wurden nicht überschritten	
11. 7. 1989	Verlust eines Cs 137-Prüfstrahlers (185 MBq)	Bei Aufräumarbeiten in die Schrottverwertung gelangt	Nicht zu erwarten, da die Aktivität auf den Inhalt eines Stahlkonverters verteilt wurde	
23. 8. 1989	Störung beim Betrieb eines Strahlengerätes (Gammamat T1) in einem Bestrahlungsbunker	Durch Herabfallen der Blende und Ausfahrspitze wurde Strahlhalter verbogen, so daß die Quelle nicht zurückgezogen werden konnte; der Magnethalter hatte sich wegen mangelnder Haftkraft gelöst	Bergung durch Experten des Herstellers, keine Überschreitung der Dosisgrenzwerte für beruflich strahlenexponierte Personen	Künftige Verwendung eines Stativs oder Sicherung des Magnetprisma mit Halteband

noch Tabelle 13

Besondere Vorkommnisse beim Umgang mit radioaktiven Stoffen und Beschleunigern

Datum	Vorkommnis	Ursache	radiologische Folgen	Beurteilung der radiol. Folgen/Bemerkungen
1	2	3	4	5
1. 9. 1989	Kontaminationsereignis bei Auspackvorgang in einem Isotopenabzug in einer kerntechnischen Einrichtung	Kontamination ausgepackter Teile	Geringe Inkorporation durch Inhalation bei 2 Personen; Aktivitätszufuhr unter 2% des Jahresgrenzwertes	Verpackung der kontaminierten Teile
4. 9. 1989	Strahlenexposition bei Radiographiearbeiten durch nicht eingefahrene Quelle in einem Bestrahlungsbunker	Blockierung des Strahlers wegen Kerbe im Ausfahrtschlauch durch herabgefallenen Kollimator	Personendosis von 1,8 mSv beim Prüfer (max. zul. Jahresdosis 50 mSv)	Prüfer hatte Zugangsverriegelung aufgehoben und die Warnleuchte zunächst mißachtet. Installation von weiteren dosisleistungsgesteuerten Warnleuchten veranlaßt
5. 9. 1989	Störung in der Steuerung einer Laborbestrahlungsanlage (154 TBq Cs 137)	Kurzschluß in der Elektroinstallation der Anlage. Gerät wurde beschädigt; Strahler war nicht mehr vollständig abgeschirmt	Keine, da der Vorgang nach Arbeitsende ablief, über Warneinrichtung gemeldet wurde; Bereich wurde rechtzeitig abgesperrt	Reparatur beim Hersteller; Inbetriebnahme nur nach Probelauf
6. 9. 1989	Verkehrsunfall eines Kleintransporters auf der BAB A 6 Heilbronn-Nürnberg	Ursache ungeklärt	Keine; der Transportbehälter wurde bei dem Unfall nicht beschädigt	
15. 9. 1989	Implantation eines undichten I 125-Seeds bei einem Patienten	Beschädigung während der operativen Implantation	Aufnahme von I 125 in den Körper des Patienten; die zusätzliche Dosis ist jedoch vernachlässigbar gering gegenüber der Dosis resultierend aus der strahlentherapeutischen Behandlung. Keine Kontamination des Personals	
4. 10. 1989	Verlust eines radioaktiven Prüfstrahlers Co 57 für eine Gamma-Kamera (Nuklearmedizin)	Unachtsamkeit; Strahler wurde auf Fahrzeugdach abgelegt, dort vergessen und während der Fahrt verloren	Aufgrund der Aktivität und der Beschaffenheit des Strahlers nicht zu erwarten	Suche blieb ergebnislos

noch Tabelle 13

Besondere Vorkommnisse beim Umgang mit radioaktiven Stoffen und Beschleunigern

Datum	Vorkommnis	Ursache	radiologische Folgen	Beurteilung der radiol. Folgen/Bemerkungen
1	2	3	4	5
9. 10. 1989	Undichte Pm 142-Quelle in einer Flächengewichtsmeßanlage	Poröse Klebung des Titanfensters der Quelle	Gefährdung des Personals nicht zu erwarten, da im Gehäuse mit Schutzfolie abgedeckt	Überprüfung von 40 Flächengewichtsanlagen des gleichen Typs ergaben 4 undichte Quellen. Hersteller der Quellen hat Überprüfung des Fertigungsverfahrens sowie konstruktive Verbesserungen eingeleitet
17. 10. 1989	Fehlleitung eines Versandstückes mit radioaktivem Inhalt durch einen Subunternehmer der DB	Menschliches Fehlverhalten	Keine; die Versandstücke mit radioaktivem Inhalt wurden von der nicht empfangsberechtigten Person nicht geöffnet	
23. 10. 1989	Freisetzung von UF6 bei Entleerung eines Behälters in einer kerntechnischen Einrichtung	Ermüdungserscheinungen an der Übergangsstelle des flexiblen Edelstahlschlauches	Anstieg der Aktivitätskonzentration in der Raumluft; keine Auswirkung auf Personen (Schutzmaske, Räumung)	Ersatz des Schlauches; Kontrolle der Schläuche vor jeder Restentleerung. Langfristig: Ersatz des Edelstahlschlauches durch Edelstahlwendelrohre
8. 11. 1989	Verzögerte Verschlussbewegung an einer medizinischen Gamma-Bestrahlungseinrichtung	Erhöhte Reibung durch verformte Teile (vermutlich durch Kollision bei Bewegungsbestrahlung)	Leicht erhöhte Einzeldosis bei einer Patientin	Instandsetzung des Gerätes, Prüfung konstruktiver Verbesserungen
8. 11. 1989	Beschädigung eines LKW-Anhängers bei der Einfahrt in einen Parkplatz auf der BAB A6 bei Schwabach	zu hohe Geschwindigkeit	Keine; die Versandstücke wurden nicht beschädigt	
4. 12. 1989	Freisetzung von insgesamt 7,4 GBq Kr 85	Zerstörung einer Flächengewichtsanlage durch Brand	Keine, da Aktivität gering, Edelgaskonzentration nach Freisetzung sehr niedrig und mit Brandgasen vermischt	

noch Tabelle 13

Besondere Vorkommnisse beim Umgang mit radioaktiven Stoffen und Beschleunigern

Datum	Vorkommnis	Ursache	radiologische Folgen	Beurteilung der radiol. Folgen/Bemerkungen
1	2	3	4	5
7. 12. 1989	Quetschung eines Fingers mit Inkorporation über die Wunde bei einer Person in kerntechnischer Einrichtung	Verkleben des Sägeblattes beim Sägen eines kontaminierten Blechdeckels	Inkorporation von U, Pu, Am; Wunde wurde exzidiert. Die Äquivalent-Folgedosis (50 a) beträgt ca. 10% des Jahresgrenzwertes	Verwendung von Spannvorrichtung vorgesehen
11. 12. 1989	Verkehrsunfall eines Kleintransporters auf der BAB A3 Würzburg-Frankfurt	Auffahrunfall, Ursache ungeklärt	Keine; der Transportbehälter wurde bei dem Unfall nicht beschädigt	

Vorkommnisse im Zusammenhang mit Ionisationsrauchmeldern im Jahr 1989

Datum	Vorkommnis	Gesamtaktivität	Bemerkungen
16. 5. 1987 Nachtrag	Verlust von 24 Ionisationsrauchmeldern durch Großbrand	700 kBq	Beseitigung mit Brandschutt
25. 5. 1987 Nachtrag	Verlust von 5 Ionisationsrauchmeldern durch Diebstahl	160 kBq	
17. 11. 1987 Nachtrag	Abhandenkommen eines Ionisationsrauchmelders durch Diebstahl	2,6 MBq	Ionisationsrauchmelder wurde mit unbeschädigtem Präparat wieder aufgefunden
22. 11. 1987 Nachtrag	Abhandenkommen von 24 Ionisationsrauchmeldern durch Brand	63 MBq	Ionisationsrauchmelder mit Brandschutt beseitigt
6. 4. 1988 Nachtrag	Verlust eines Ionisationsrauchmelders durch Diebstahl in Tiefgarage	555 kBq	Diebstahlsicherung war aktiviert, Diebstahl wurde in Brandmeldezentrale angezeigt
7. 4. 1988 Nachtrag	Verlust eines Ionisationsrauchmelders bei Umbauarbeiten	2,7 MBq	
August 1988 Nachtrag	Einfuhr von 25 Ionisationsrauchmeldern ohne Einfuhrgenehmigung, Nichtbeachtung der Bestimmung der StrlSchV	je 37 kBq Am 241	Melder wurden sichergestellt; Importeur über Einfuhrbestimmungen belehrt und verwahrt
27. 2. 1989	Verlust von 65 Ionisationsrauchmeldern durch Brand	1,92 GBq	26 der 65 Ionisationsrauchmelder wurden geborgen und über Landessammelstelle entsorgt
12. 5. 1989	Verlust eines Ionisationsrauchmelders in einer Schule, vermutlich Diebstahl	2,9 kBq Ra 226	Belehrung der Schüler, Aufforderung zur Rückgabe. Einbau von Diebstahlsicherungen
12. 5. 1989	Einfuhr und Vertrieb von 720 nicht bauartzugelassenen Ionisationsrauchmeldern, Nichtbeachtung der Strahlenschutzverordnung		717 Melder an Hersteller zurückgegeben, Verbleib von 3 verkauften Meldern konnte nicht ermittelt werden. Ordnungswidrigkeitsverfahren gegen Firma wurde eingeleitet
3. 7. 1989	Verlust eines Ionisationsrauchmelders, Gerät wurde bei Arbeiten in einer Lagerhalle abgerissen und ist wahrscheinlich in den Abfall gelangt	2,66 MBq Am 241	Melder wurden gegen solche mit Rückmeldung der Entfernung ausgetauscht und nicht mehr im Aktionsbereich von Flurförderfahrzeugen installiert
13. 10. 1989	Verlust eines Ionisationsrauchmelders, wurde versehentlich nach Austausch liegengelassen und anschließend mit Hausmüll entsorgt	18,5 kBq Am 241	
15. 11. 1989	Sicherstellung von 2 Ionisationsrauchmeldern bei einem Schüler, der Schüler hatte die Melder bei einem Urlaub in Schweden entwendet		

noch Tabelle 14

Vorkommnisse im Zusammenhang mit Ionisationsrauchmeldern im Jahr 1989

Datum	Vorkommnis	Gesamtaktivität	Bemerkungen
1. 12. 1989	Erwerb von Rauchmeldern ohne erforderliche Genehmigung, Unkenntnis der rechtlichen Zusammenhänge, keine Anzeige des Verkaufs durch Hersteller		Behördliche Ermittlungen noch nicht abgeschlossen

Tabelle 15

Mittlere effektive Dosis durch inkorporiertes Caesium 134 und Caesium 137 in μSv im Jahre 1989 als Folge des Reaktorunfalls in Tschernobyl

	München	Karlsruhe	Homburg/ Saar	Frankfurt	Berlin	Hamburg	Köln	Düssel- dorf	Mainz
Männer	12	6	6 ^{a)}	6	7	6 ^{a)}	5	5	7
Frauen	5	4	4 ^{a)}	4	4	4	3	3	5
Kinder und Jugendliche	6 ^{a)}	4 ^{a)}	—	5	—	—	—	—	—

^{a)} = für das ganze Jahr hochgerechnet

Abbildung 1

Anzahl der mit Personendosimetern überwachten Personen insgesamt und in der Medizin (in Tsd.)

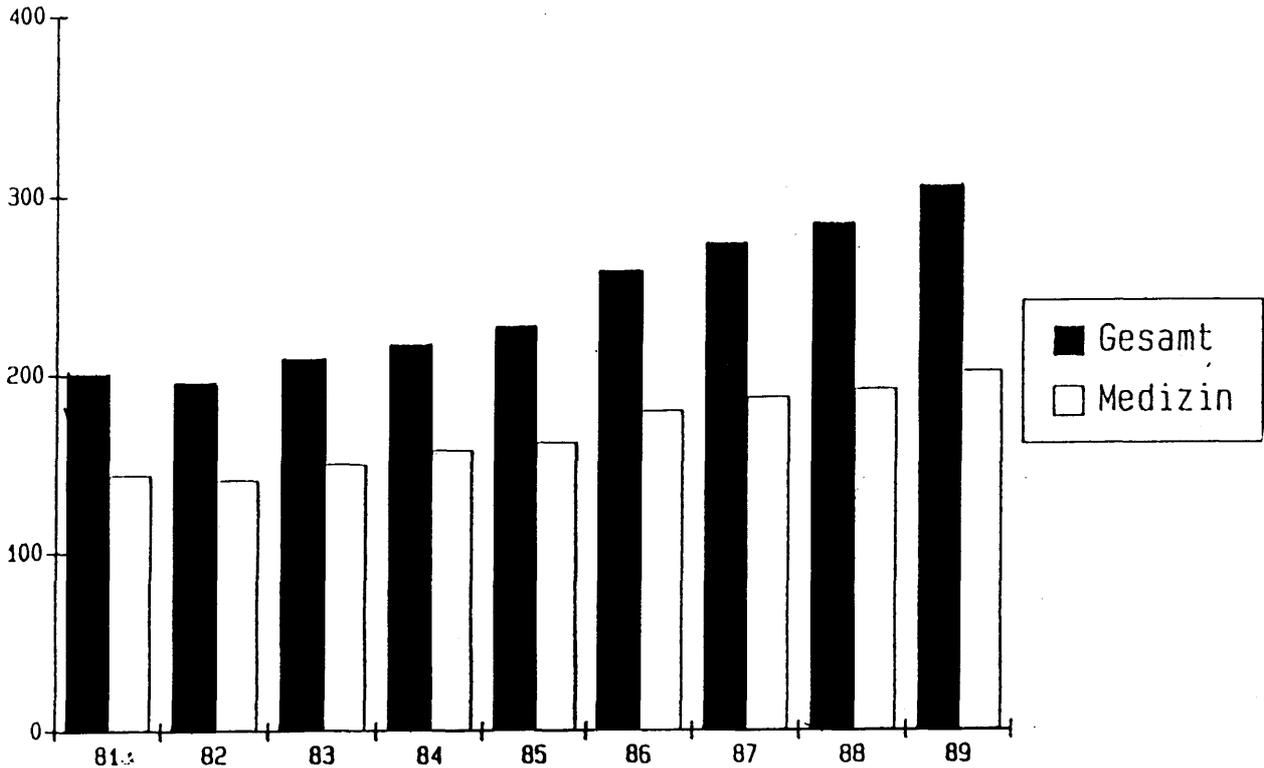


Abbildung 2

Verteilung der Jahreskollektivdosis auf verschiedene Arbeitsbereiche

