

## **Unterrichtung**

**des Ausschusses für Bildung, Forschung und Technikfolgenabschätzung  
(17. Ausschuss) gemäß § 56a der Geschäftsordnung**

### **Technikfolgenabschätzung**

**hier: Leichter-als-Luft-Technologie –  
Innovations- und Anwendungspotenziale**

#### Inhaltsverzeichnis

	Seite
<b>Vorwort des Ausschusses</b> .....	3
<b>Zusammenfassung</b> .....	4
<b>I. Einleitung</b> .....	7
<b>II. Stand der Technik/Entwicklungsbedarf</b> .....	8
1. Flugprinzip „Leichter-als-Luft“ .....	8
1.1 Der statische Auftrieb .....	8
1.2 Nutzungsaspekte des natürlichen Auftriebspotenzials .....	9
2. Stand der Technik .....	11
2.1 Typische Bauformen .....	11
2.2 Umwelt und Sicherheit .....	16
2.3 Systemkomponenten und Entwicklungsbedarf .....	17
3. Zulassung und Betrieb .....	23
<b>III. Einsatzfelder und Marktpotenziale</b> .....	24
1. Werbung .....	25
2. Tourismus .....	25
3. Missionsplattformen .....	27
4. Personentransport .....	28
5. Güterverkehr/Lastentransport .....	28

---

	Seite
6. Stratosphären-Plattformen .....	29
7. LaL für sich entwickelnde Länder .....	30
8. Fazit .....	32
<b>IV. Handlungsoptionen</b> .....	<b>32</b>
1. Synergien fördern .....	32
2. Aufbau einer „Leichter-als-Luft“-Forschungs- und Entwicklungsstelle	32
3. Wissensbasis verbreitern und Erfahrungsaustausch intensivieren . . .	33
4. Verlässliche Regeln und Standards schaffen .....	34
5. Flexibles Förderprogramm auflegen .....	34
<b>Literatur</b> .....	<b>35</b>
1. In Auftrag gegebene Gutachten .....	35
2. Weitere Literatur .....	35
<b>Anhang: Überblick über LaL-Projekte</b> .....	<b>36</b>
1. Luftschiff-Projekte aus historischer Sicht .....	36
2. Ausgewählte neuere Projekte .....	37
3. Tabellenverzeichnis .....	41
4. Abbildungsverzeichnis .....	41

### **Vorwort des Ausschusses**

Die spektakulären ersten Überseereisen mit Zeppelinen in den 30er-Jahren, die brennende „Hindenburg“ über Lakehurst, der Konkurs der CargoLifter AG im August 2002 markieren Visionen und Scheitern in der über hundertjährigen Geschichte der Zeppeline.

Können Leichter-als-Luft-Technologien (LaL-Technologien) wie Luftschiffe oder Höhenplattformen langfristig einen wirtschaftlichen, ökologischen und technisch sicheren Beitrag zur Deckung des weltweit steigenden Bedarfs an Personen- und Gütertransport sowie Information und Kommunikation leisten?

Das Büro für Technikfolgenabschätzung beim Deutschen Bundestag (TAB) wurde vom Ausschuss für Bildung, Forschung und Technikfolgenabschätzung im Juni 2003 beauftragt, sich dieser Fragestellung mit dem Projekt „Leichter-als-Luft-Technologie – Innovations- und Anwendungspotenziale“ anzunehmen.

Im vorliegenden Abschlussbericht des TAB werden die physikalischen Grundlagen der LaL-Technologie dargestellt, ein Überblick über den gegenwärtigen Stand der Technik gegeben und der Forschungs- und Entwicklungsbedarf aufgezeigt.

Dabei wird auch auf die rechtlichen Rahmenbedingungen für den Bau und Betrieb von LaL-Systemen eingegangen. An Hand spezifischer Einsatzfelder der LaL-Technologie werden Marktpotenziale aufgezeigt.

Empfehlungen, wie die Entwicklung der LaL-Technologie und ihre innovativen Potenziale in den Bereichen Telekommunikationsplattformen, Tourismus und Cargo-Dienste durch Maßnahmen in Forschung, Politik und Wirtschaft gefördert werden können, schließen den Bericht ab.

Das TAB kommt zu dem Schluss, dass in Anbetracht langer Entwicklungszeiten und hoher Entwicklungskosten die in große LaL-Systeme gesetzten visionären Erwartungen bisher nicht erfüllt werden konnten. Deutschland nehme zwar immer noch eine international führende Position in der LaL-Technologie ein; der Vorsprung schwinde aber angesichts groß angelegter ziviler und militärischer Entwicklungsprogramme in den USA und Japan.

Die Autoren des Berichtes sehen einen Bedarf für die nach wie vor faszinierende aber auch mit einem erheblichen Entwicklungsrisiko behaftete Technologie. Die technische Machbarkeit in einzelnen Marktsegmenten müsse keine Illusion bleiben. Der Entwicklungsaufwand leistungsfähiger LaL-Systeme sei jedoch nach der Einschätzung von Experten vergleichbar mit dem europäischen Airbus-Projekt. Der bisherige Systemvorsprung Deutschlands und die Entwicklung von auf dem Markt überlebensfähigen Systemen könne nur durch gemeinsame wirtschaftliche und staatliche Anstrengungen gewährleistet werden.

Der Bericht des TAB bietet eine umfassende wie sachliche Informationsgrundlage und mögliche Handlungsoptionen für eine zukünftige parlamentarische Befassung mit der LaL-Technologie.

Berlin, den 21. April 2005

### **Der Ausschuss für Bildung, Forschung und Technikfolgenabschätzung**

**Cornelia Pieper, MdB**

Ausschussvorsitzende

**Ulla Burchardt, MdB**

Stellvertretende Vorsitzende,  
Berichterstatteerin

**Axel E. Fischer, MdB**

Berichterstatte

**Hans-Josef Fell, MdB**

Berichterstatte

**Ulrike Flach, MdB**

Berichterstatteerin

## Zusammenfassung

In den Lüften schweben, mühelos: Dieser alte Menschheitstraum schien mit den „Riesenzigarren“ des Grafen Zeppelin Anfang des letzten Jahrhunderts in Erfüllung zu gehen. Einen herben Rückschlag erlitt dieser Traum mit dem spektakulären Brand des Zeppelins „Hindenburg“ im Jahr 1937. Dennoch sind Luftschiffe für viele ein faszinierendes Thema geblieben, und auch heute verbinden sich mit „Leichter-als-Luft (LaL)-Technologie“ optimistische Erwartungen hinsichtlich ihres Einsatzes in zahlreichen Märkten und für vielfältige zivile und militärische Aufgaben.

## Forschungs- und Entwicklungsbedarf

Vergegenwärtigt man sich, dass das verfügbare LaL-Wissen in erheblichem Umfang auf etwa 40 bis 60 Jahre alten Archiven (Zeppelin Archiv, NASA Reports) basiert, wird klar, dass heutige Luftschiffprojekte auf einer vergleichsweise dünnen Daten- und Wissensbasis aufbauen. Deshalb ist die LaL-Technologie von einem Optimierungsstadium – wie es in der allgemeinen Luftfahrt erreicht ist – noch relativ weit entfernt. FuE-Bedarf besteht in einer Vielzahl von Feldern:

### Hüllenmaterialien

Ein Optimierungsproblem liegt darin, dass hohe Festigkeit und geringe Gasdurchlässigkeit mit einem möglichst geringen Gewicht erreicht werden sollen. FuE-Bedarf besteht deshalb in der optimierten Auslegung einzelner Materialschichten in Bezug auf die gewünschten Eigenschaftskombinationen (z. B. hohe Zug- und Weiterreißfestigkeit, hohe Gasdichtheit, gute Verarbeitbarkeit, Knickunempfindlichkeit).

### Struktur und Konstruktion

Durch Interaktion von Struktur und Hülle respektive Ballonets entstehen komplexe strukturmechanische Probleme, zu deren Lösung insbesondere für sehr große Luftschiffe noch intensive Forschung und Entwicklung erforderlich ist.

### Antriebstechnologien und Steuerung

Bei den konventionellen Antrieben besteht Forschungsbedarf im Wesentlichen bei Getrieben und Fernwellen und in der Triebwerksregelung (z. B. für Manövertriebwerke). Für elektrische Antriebe müssten Batteriekonzepte als Energiespeicher und -puffer oder Brennstoffzellensysteme weiterentwickelt werden. Ebenso besteht Forschungsbedarf bei hocheffizienten flexiblen Solarzellen für eine Anwendung, z. B. in Stratosphären-Plattformen.

Um eine verbesserte aerodynamische Stabilität und Steuerbarkeit von Luftschiffen zu erreichen, ist eine Weiterentwicklung von Fly-by-wire-Flugsteuerungen erforderlich.

## Traggasmanagement

Die Entwicklung von effektiven und kostengünstigen Hülleninspektionsverfahren ist insbesondere für größere Luftschiffe notwendig. Zur Überwachung der Heliumreinheit sind Bordsysteme im Luftschiff und/oder externe Messsysteme nötig. Solche Systeme müssen deshalb noch in Entwicklungsvorhaben konzipiert und optimiert werden. Bei einem Einsatz von Wasserstoff als Traggas ist neben der technischen Eignung eine mögliche Gefährdung zu prüfen.

## Einsatzfelder, Marktpotenziale

Werbung und Tourismus (Rundflüge) sind die etablierten kommerziellen Einsatzfelder der derzeit existierenden kleinen und mittelgroßen (Zeppelin NT) Luftschiffe. Diese Felder könnten – von den erprobten Technologien ausgehend – schrittweise intensiver besetzt werden. Größere Technologiesprünge sind hierfür nicht erforderlich. Der Einsatz dieser Luftschiffe als Missionsplattformen (z. B. für TV-Übertragungen, Umweltmonitoring oder Minensuche) bietet sich vor allem als Mitnahmemarkt an.

Zukunftspotenziale könnten sich für die LaL-Technologie insbesondere bei Stratosphären-Plattformen für Telekommunikation und Überwachungsaufgaben sowie im Cargo-Markt eröffnen. Diese Märkte können aber nur mit großen Luftschiffen von 250 m Länge und mehr bedient werden. Die für diese Luftschiffe notwendigen Technologien befinden sich aber teilweise noch im Stadium der Grundlagenforschung. In Anbetracht der langen Entwicklungszeiten und der hohen Kosten, ist es fraglich, ob in absehbarer Zeit potenzielle Investoren dieses hohe Risikopotenzial auf sich nehmen werden.

### Werbung

Der Werbemarkt insgesamt ist heiß umkämpft, und Luftschiffwerbung als nicht zielgruppenorientierte Werbung steht in Konkurrenz beispielsweise zu Banden- oder Großbildwerbung. Der relativ hohe Mietpreis begrenzt den Markt auf Großunternehmen mit hohem Marketingbudget. Möglichkeiten der Weiterentwicklung dieses Marktsegmentes liegen insbesondere in inkrementellen Verbesserungen bestehender Konzepte, z. B. Luftschiffe mit Leuchtausstattung oder mit besonderen Bauformen (z. B. eine „fliegende Bierflasche“).

### Tourismus

Die wichtigsten Segmente des Luftschiff-Tourismus-Marktes sind Rundflüge zum Sightseeing und mehrtägige Kreuzfahrten. Der Markt für Rundflüge/Sightseeing ist allerdings ein hart umkämpfter touristischer Nischenmarkt. Luftschiffe stehen hier in Konkurrenz zu den etablierten Systemen Flugzeug, Hubschrauber und Ballons. Den Vorteilen von Luftschiffen, z. B. gute Sicht und Komfort, stehen zumeist Kostennachteile im Vergleich mit den Konkurrenzsystemen gegenüber. Möglichkeiten zum Ausbau dieses Marktsegmentes liegen insbesondere in der Entwicklung von Luftschiffen mit einer größeren Passagierkapazität als die der existierenden Schiffe mit

13 Plätzen. Hierdurch könnten die Betriebskosten pro Passagier gesenkt und damit die Wirtschaftlichkeit verbessert werden.

Im Marktsegment der Kreuzfahrten müssten Luftschiffe vor allem mit den etablierten Kreuzfahrtschiffen konkurrieren. Der dortige hohe Komfort ist mit Luftschiffen schwer erreichbar. Darüber hinaus ist es fraglich, ob – selbst im Luxusreisesegment – kostendeckende Preise erzielt werden können.

### **Missionsplattformen**

Luftschiffe können mit unterschiedlichsten Sensoren und Auswertesystemen sowie Sende- und Empfangsanlagen ausgestattet werden, um eine Vielzahl von Einsatzmöglichkeiten für zivile (z. B. TV-Übertragungen), hoheitliche (z. B. Verkehrsüberwachung) sowie militärische (z. B. Minensuche) Anwendungen abzudecken. Dabei handelt es sich um kleinere Fluggeräte, die – anders als Stratosphären-Plattformen (s. u.) – in geringer Höhe operieren.

Je nach Anforderungsprofil konkurrieren Luftschiffe mit Hubschraubern, Flugzeugen und Satelliten. Luftschiffe besitzen gegenüber Hubschraubern und Flugzeugen Vorteile, wenn eine hohe Überwachungsintensität gefordert ist, gegenüber Satelliten erlauben Luftschiffe eine präzisere Beobachtung von kleineren Strukturen. Vorteile besitzen Luftschiffe für einige Anwendungen auch wegen ihrer Lärm- und Vibrationsarmut.

Gemeinsam ist den meisten dieser Einsatzfelder, insbesondere denen im nichtmilitärischen Bereich, dass sie nur kurzfristige bzw. punktuelle Einsätze eröffnen. Diese Märkte könnten von Luftschiffbetreibern daher vorwiegend als Mitnahmemarkt bedient werden, wenn die geforderte Ausrüstung erprobt und verfügbar ist.

### **Personentransport**

Im Sektor Personentransport werden hohe Anforderungen an Zuverlässigkeit und Pünktlichkeit gestellt, die mit herkömmlichen Luftschiffen nur schwer realisierbar sind.

Für die Personenbeförderung im Linienbetrieb kommen vor allem zwei Konzepte in Betracht. Erstens könnten Luftschiffe mit sehr leistungsstarken Motoren ausgerüstet werden, um auch gegen starke Winde die geplante Reisegeschwindigkeit zu erreichen. Dies könnte aber die Umweltvorteile (geringer Treibstoffverbrauch, geringe Lärmemission), die Luftschiffe vielfach gegenüber anderen Verkehrsträgern haben, zunichte machen. Die zweite Strategie wäre die Entwicklung von Hybridluftschiffen, die einen Teil ihres Auftriebs aerodynamisch (wie ein Flugzeug) erzeugen. Dies setzt aber grundsätzliche technologische Neuentwicklungen voraus. Konzeptstudien hierfür liegen bereits vor.

### **Güterverkehr/Lastentransport**

Der Cargomarkt wird durch die konventionellen Verkehrsträger LKW, Schiff und Flugzeug (Hubschrauber) weitgehend abgedeckt. Mögliche Nischen für Luftschiffe

liegen vor allem im Bereich der Schwer- und Spezialtransporte. Ein entscheidender Vorteil von Luftschiffen wäre die Realisierung eines Punkt-zu-Punkt-Transportes von Gütern. Dieser könnte den Geschwindigkeitsnachteil von Luftschiffen gegenüber Flugzeugen relativieren oder sogar aufheben.

Obwohl der Cargomarkt ein interessantes Feld mit Zukunftspotenzial zu sein scheint, ist es zum gegenwärtigen Zeitpunkt fraglich, ob der Markt im zivilen Bereich ausreichend groß ist, dass potenzielle Investoren den hohen finanziellen Einsatz und das hohe Risiko der Entwicklung von Schwerlastluftschiffen auf sich nehmen. Als Marktchance wird daher vielfach eine militärisch finanzierte Basisentwicklung gesehen.

### **Stratosphären-Plattformen**

Stratosphären-Plattformen sollen in großer Höhe (ca. 20 km) operieren. Sie eignen sich vor allem für zwei Einsatzfelder: als Relais-Stationen für die Telekommunikation sowie als Plattformen für Überwachungsaufgaben. Das erste Feld ist zivil, das zweite militärisch dominiert.

Ein in der Stratosphäre als Relaisstation stationiertes Luftschiff wäre technisch in der Lage, ein Zielgebiet mit einem Durchmesser von bis zu 400 km mit Breitbanddiensten zu versorgen. Im Gegensatz zu Kommunikationssatelliten wären Stratosphären-Plattformen zur Wartung, Reparatur oder Ausstattung mit neuer Hard- und Software rückholbar sowie vermutlich deutlich billiger.

Das zweite mögliche Einsatzfeld sind Aufklärungs- und Überwachungsmissionen. Hier konkurrieren Stratosphären-Plattformen vor allem mit Satelliten bzw. mit bemannten und unbemannten Aufklärungsflugzeugen (Drohnen). Gegenüber Satelliten haben sie den technologischen Vorteil einer ca. 50-mal höheren Auflösung und Sensitivität. Anders als Aufklärungsflugzeuge bieten sie die Möglichkeit einer lang andauernden kontinuierlichen Überwachung größerer Gebiete.

Als Markthemmnisse werden primär die hohen Entwicklungskosten und das hohe Risikopotenzial genannt. Wichtige benötigte Technologien sind noch relativ weit von der Einsatzreife entfernt. Die Tatsache, dass die USA in diesem Feld eine Reihe von offenbar aufeinander abgestimmten militärischen Entwicklungsprogrammen betreibt, lässt vermuten, dass das Thema eine hohe Priorität erhalten hat. Viele Experten erwarten, dass eine militärisch getriebene Basisentwicklung einen Technologie-Push auslösen könnte, der auch der zivilen Anwendung der LaL-Technologie neue Perspektiven eröffnet.

### **LaL in sich entwickelnden Ländern**

Oftmals werden Luftschiffe pauschal als besonders attraktiv für den Einsatz in sich entwickelnden Ländern angesehen. Als Grund wird die fehlende oder mangelhafte Infrastruktur zum Personen- bzw. Gütertransport angegeben. Allerdings ist hier eine differenzierte Betrachtung je nach konkretem Einsatzgebiet erforderlich.

Ein Feld mit einem Zukunftspotenzial könnten Spezial-einsätze im hoheitlichen und zivilen Bereich sein, wie z. B. die Sicherung der Landesgrenzen, die Überwachung von Goldminen, Erdölfeldern, Pipelines, Wäldern und landwirtschaftlichen Anbaugebieten, der Krankentransport, die Detektion von Landminen.

Im Sinne des Einsatzes von angepasster Technologie kommen vor allem Heißluftschiffe für diesen Bereich in Betracht. Ein Wettbewerbsvorteil im Vergleich zu etablierten Konkurrenzsystemen – vor allem Hubschrauber – ist, dass sie vergleichsweise einfach aufgebaut sind und das zu ihrem Betrieb erforderliche technische Know-how überschaubar ist.

### **Umwelt und Sicherheit**

Die heute operierenden Luftschiffe sind vergleichsweise emissionsarme und damit umweltfreundliche Verkehrsträger. Im Gegensatz zu anderen Luftfahrzeugen können sie in der Luft schweben, ohne Energie zu verbrauchen und bewegen sich mit relativ geringer Geschwindigkeit (meist weniger als 80 bis 100 km/h) fort. Ob diese Einschätzung auch für neu zu entwickelnde Großluftschiffe zutrifft, kann erst nach differenzierter Analyse des konkreten Anwendungsfalls gesagt werden: So ist zunächst zu berücksichtigen, dass ein größerer Querschnitt mehr Luftwiderstand und damit einen höheren Energiebedarf erzeugt. Ebenso steigt der Energiebedarf, wenn die zu erreichende Reisegeschwindigkeit höher gewählt wird und wenn diese zudem unter schwierigen Witterungsbedingungen (z. B. starker Gegenwind) erreicht werden soll. Nicht zuletzt hängt der Energieverbrauch im praktischen Einsatz eines Luftschiffs auch von den Betriebsszenarien ab, z. B. wenn der Flug häufig im energetisch und emissionsseitig ungünstigen Teillastbereich der Motoren bzw. Turbinen stattfindet.

Der Betrieb von Luftschiffen könnte nahezu emissionsfrei gestaltet werden, wenn es gelänge, regenerative Energien (Solarzellen, regenerativ erzeugter Wasserstoff, Brennstoffzellen) in das Antriebssystem zu integrieren. Ein Dauereinsatz von Luftschiffen in der Stratosphäre wäre ohne regenerative Technologien nur schwer vorstellbar.

Da nahezu alle nichtmilitärischen Einsatzgebiete von Luftschiffen Nischenmärkte sind, ist mit einer nennenswerten Substitution von konventionellen Verkehrsträgern und einer merklichen Reduktion der verkehrsbedingten Gesamtemissionen gegenwärtig nicht zu rechnen.

Luftschiffe sind nicht „per se“ sicherer als Flugzeuge. Eine Beschädigung der Hülle führt dazu, dass Traggas – und damit Auftrieb – verloren geht. Dieser Verlust ginge auch bei größeren Schäden relativ langsam vonstatten, so dass die Gefahr eines abrupten Absturzes kaum besteht. Die Wucht des Aufpralls wäre daher meist geringer als bei einem Flugzeugabsturz. Da dieser Zusammenhang bei der Auslegung der Kabine und anderer Sicherheitseinrichtungen bereits berücksichtigt wird, kann insgesamt gesehen von einem etwa gleich hohen Sicherheitsniveau wie bei Flugzeugen ausgegangen werden.

Luftschiffe können im Prinzip allwettertauglich ausgerüstet werden. Dennoch bleibt der Luftschiffbetrieb wetter-

abhängig. Eine meteorologische Missionsplanung mit Berechnung der bei Abflug und Ankunft vorliegenden Auftriebspotenziale sowie die Vorbereitung entsprechender Maßnahmen sind daher unumgänglich.

### **Handlungsoptionen**

Zur staatlichen Unterstützung der Ausschöpfung der dargestellten Potenziale der LaL-Technologie kommt eine Reihe von Handlungsoptionen in Betracht, die im Folgenden skizziert werden. Diese könnten jeweils einzeln oder aber in Kombination miteinander gewählt werden, so dass eine abgestimmte und gestufte Strategie zur Förderung der LaL-Technologie entwickelt und umgesetzt werden könnte.

### **Synergien fördern**

Die LaL-Technologie zeichnet sich weniger durch grundlegende Neuentwicklungen aus, als durch Adaption und Integration von technologischen Fortschritten, die auf anderen Gebieten erzielt werden. Die Förderung von Synergien mit diesen Gebieten bietet sich daher an.

### **Aufbau einer „Leichter-als-Luft“-Forschungs- und Entwicklungsstelle**

Mit der LaL-Technologie sind hohe Entwicklungsrisiken auf einem breiten technologischen Feld verbunden. Damit diese Aufgabe von den Akteuren, die die LaL-Forschung und -Entwicklung betreiben, gemeistert werden kann, wäre eine logistische und koordinierende Unterstützung in Form einer „LaL-Forschungs- und Entwicklungsstelle“ ins Auge zu fassen. Zentrale Aufgaben dieser Stelle wären: die Kooperation der Akteure der LaL-Forschungslandschaft zu fördern, das vorhandene Know-how zusammenzutragen und mit dem Ziel der Vermarktung aufzubereiten sowie eine Systematik der Produktentwicklung für zukünftige LaL-Projekte zu erstellen. Auf diese Weise könnte eine LaL-Forschungs- und Entwicklungsstelle als Multiplikator zur Sicherung der Technologieführerschaft Deutschlands wirken.

### **Wissensbasis verbreitern und Erfahrungsaustausch intensivieren**

Eine weitere Möglichkeit, das relativ weit verstreute Wissen zu bündeln, bestünde darin, den wissenschaftlichen Austausch in Deutschland aber auch weltweit zu fördern. Die Fachgruppe Leichter als Luft der Deutschen Gesellschaft für Luft- und Raumfahrttechnik (DGLR) veranstaltet regelmäßig Konferenzen zu LaL und verwandten Themen. Es wäre zu erwägen, Aktivitäten wie diese – auch im europäischen Rahmen – zu verstärken.

Im CargoLifter-Projekt ist Forschung und Entwicklung intensiv betrieben und das Know-how zur LaL-Technologie in vielen Punkten entscheidend erweitert worden. Dieses Wissen sollte – soweit möglich – gesichert und aufbereitet werden; die Ergebnisse sollten der Öffentlichkeit zugänglich sein.

### Verlässliche Regeln und Standards schaffen

Zur Entwicklung, zum Bau und zum Betrieb von Luftfahrtgeräten sind allgemein gültige und international harmonisierte Regeln und Standards erforderlich. Für Luftschiffe existieren solche Vorschriften nur rudimentär, von einer internationalen Harmonisierung kann keine Rede sein.

Eine proaktive Rolle von Luftfahrt-Bundesamt und EASA (European Aviation Safety Agency) bei der Ausarbeitung und internationalen Harmonisierung dieser Regularien wäre wünschenswert. Eine intensive entwicklungsbegleitende Kooperation mit Hersteller- und Betreiberunternehmen ist empfehlenswert. Für zukünftige LaL-Projekte in Deutschland könnte es sich als großer Wettbewerbsvorteil erweisen, wenn die Basis internationaler Vorschriften maßgeblich in Deutschland erarbeitet werden würde.

### Flexibles Förderprogramm auflegen

Unter der Bedingung, dass die Ausschöpfung der dargestellten Potenziale der LaL-Technologie als wirtschaftlich und gesellschaftlich wichtig eingeschätzt wird und die Technologieführerschaft Deutschlands auf diesem Gebiet erhalten werden soll, wäre zu prüfen, ob die öffentliche Hand ein Förderprogramm auflegen sollte, um die technologische Machbarkeit insbesondere von Stratosphärenplattformen und Luftschiffen zum Schwerlasttransport zu demonstrieren sowie den Bau von Prototypen voranzutreiben. Orientierung für die Ausgestaltung könnten beispielsweise die zurzeit laufenden Stratosphären-Plattform-Programme in Japan bzw. in den USA bieten.

Um realistische Aussichten auf Erfolg zu haben, müsste eine solche Förderstrategie langfristig ausgerichtet sein, mit einer Zeitperspektive von 10 bis 15 Jahren. Das Gesamtvolumen eines solchen Programms dürfte über die gesamte Laufzeit in der Größenordnung 300 bis 400 Mio. Euro liegen. Vertretbar wäre dies allerdings nur, wenn gleichzeitig in erheblichem Umfang industrielle Eigenmittel mobilisiert werden könnten.

## I. Einleitung

In den Lüften schweben, mühelos: Dieser alte Menschheitstraum schien mit den „Riesenzigarren“ des Grafen Zeppelin Anfang des letzten Jahrhunderts in Erfüllung zu gehen. Einen herben Rückschlag erlitt dieser Traum mit dem spektakulären Brand des Zeppelins „Hindenburg“ im Jahr 1937. Dennoch sind Luftschiffe für viele ein faszinierendes Thema geblieben, das je nach Temperament oder Interesse sowohl spontane Begeisterung als auch Staunen oder Ablehnung hervorruft.

Die Leichter-als-Luft (LaL)-Technologie hat im 20. Jahrhundert immer wieder Hoffnungen auf technologische Fortschritte geweckt und damit wirtschaftliche Ambitionen aber auch das Interesse von Militärs stimuliert. Grund dafür sind die – im Vergleich zu Flugzeugen – einzigartigen Fähigkeiten und Möglichkeiten von Luftschiffen insbesondere, senkrecht starten und landen zu können, als „fliegender Kran“ Güter im Schwebeflug aufzunehmen bzw. punktgenau abzusetzen sowie große und schwere

Lasten über weite Strecken auch in Gebiete mit nicht vorhandener Infrastruktur transportieren zu können.

Bislang konnte die LaL-Technologie die in sie gesetzten hohen Erwartungen jedoch nicht erfüllen. Es wurden nur wenige konkrete Entwicklungsvorhaben zum Bau größerer Luftschiffe durchgeführt und die meisten davon sind aus unterschiedlichen Gründen nicht über die Konzeptionsphase bzw. den Bau von Prototypen hinausgekommen. Oftmals wurde die Entwicklungszeit bis zum funktionsfähigen Produkt unterschätzt. Von Experten wird die Entwicklung großer LaL-Systeme – z. B. als Telekommunikations-Plattformen oder zum Cargo-Transport – als „technologisch und finanziell ähnlich anspruchsvoll, wie einen Airbus zu konstruieren“ (Busemeyer 2002), eingeschätzt.

In Deutschland wurde das derzeit größte und technisch am weitesten fortgeschrittene Luftschiff weltweit entwickelt und gebaut (Zeppelin NT). Hier sind das umfangreichste Wissen auf dem Gebiet der LaL-Technologie sowie die ausgeprägteste Erfahrung mit der Entwicklung, dem Bau und dem Betrieb großer Luftschiffe verfügbar. In jüngster Zeit wird diese Position aber von den USA und Japan durch groß angelegte Entwicklungsprogramme in Frage gestellt.

Angesichts der gegenwärtigen Problemlagen im Verkehrssektor – hoher Energieverbrauch und hohe Emissionen, Kapazitätsengpässe im Güterverkehr, Stauproblematik, stark ansteigender Luftverkehr – kommt Innovationen in diesem Sektor eine besondere gesellschaftliche Bedeutung zu. Daher ist es durchaus legitim, auch auf den ersten Blick exotisch erscheinende Technologien wie die LaL-Technologie im Hinblick auf ihre diesbezüglichen Problemlösungspotenziale zu untersuchen und in die Diskussion um geeignete technologische Optionen einzubeziehen.

Aus diesen Gründen hat im Sommer 2003 der Ausschuss für Bildung, Forschung und Technikfolgenabschätzung des Deutschen Bundestages beschlossen, das Thema „Leichter-als-Luft-Technologie – Innovations- und Anwendungspotenziale“ durch das Büro für Technikfolgenabschätzung beim Deutschen Bundestag (TAB) bearbeiten zu lassen.

Ziel des vorliegenden Berichts ist es, eine nüchterne Bestandsaufnahme des Standes der Technik durchzuführen sowie die Potenziale der LaL-Technologie auszuleuchten, sowohl was die technologische Weiterentwicklung als auch was die heutigen und in Zukunft erschließbaren Einsatzfelder und Marktpotenziale angeht.

Der Bericht ist folgendermaßen aufgebaut: Das folgende Kapitel II beschreibt den gegenwärtigen Entwicklungsstand der LaL-Technologie und zeigt den bestehenden Forschungs- und Entwicklungsbedarf auf. Außerdem werden die rechtlichen Rahmenbedingungen, die für den sicheren Bau und Betrieb von Luftschiffen erforderlich sind, thematisiert. In Kapitel III werden Einsatzfelder und Marktpotenziale von LaL-Systemen in den unterschiedlichen möglichen Anwendungsbereichen dargelegt. Den Abschluss bildet Kapitel IV, in dem Handlungsoptionen

aufgezeigt werden, mit denen die Erschließung der Potenziale der LaL-Technologie gefördert werden könnte.

Der vorliegende Bericht stützt sich wesentlich auf die im Rahmen dieses Projektes vergebenen Gutachten von Prof. Dr. A. Gebhardt (Fachhochschule Aachen, Fachbereich Maschinenbau und Mechatronik), Prof. Dr. B. Kröplin (Institut für Statik und Dynamik der Luft- und Raumfahrtkonstruktionen an der Universität Stuttgart), Herrn M. Mandel (Meckenbeuren) sowie der Zeppelin Luftschifftechnik GmbH (Autoren: B. Sträter, R. Gritzbach, J. Fecher, F. Maugeri, Friedrichshafen). Die Verantwortung für die Auswahl und Strukturierung der darin enthaltenen Informationen sowie ihre Zusammenführung mit weiteren Quellen liegt bei den Autoren des vorliegenden Berichts. Den Gutachtern sei an dieser Stelle nochmals ausdrücklich für die Ergebnisse ihrer Arbeit und die gute Zusammenarbeit gedankt.

## II. Stand der Technik/Entwicklungsbedarf

Zu den Leichter-als-Luft-Systemen (LaL-Systeme) gehören in der folgenden Betrachtung in erster Linie alle Geräte, die einen wesentlichen Teil des zum Fliegen benötigten Auftriebes aus dem „statischen Auftrieb“ beziehen und nicht – wie bei „Schwerer als Luft-Geräten“ wie Flugzeuge – mit aerodynamischen Mitteln (Auftrieb aus der dynamischen Umströmung der Flügel) erzeugen. „Hybride Systeme“ werden nur partiell – soweit im Einzelfall sinnvoll – mit betrachtet. Der Fokus liegt auf heliumgefüllten Luftschiffen. Alternative Traggase werden ergänzend berücksichtigt. Ballone und unbemannte Kleinluftschiffe werden nicht behandelt.

### 1. Flugprinzip „Leichter-als-Luft“

Das Basisprinzip, auf Grund dessen LaL-Systeme fliegen, ist der statische Auftrieb. Dieser verändert sich unter bestimmten natürlichen Randbedingungen, die wiederum das räumliche Einsatzpotenzial von Luftschiffen beein-

flussen. Ziel dieses Abschnittes ist es, die technischen und wetterbedingten Grenzen von Luftschiffen aufzuzeigen.

#### 1.1 Der statische Auftrieb

Ballone und Luftschiffe unterliegen aerostatischen Gesetzen; man nennt sie deshalb auch Aerostaten. Sie fliegen nach demselben Prinzip, das Schiffe schwimmen lässt: Jeder Körper erfährt einen Auftrieb, der genau dem Gewicht des verdrängten Mediums (Wasser bzw. Luft) entspricht. Ist ein Körper leichter als die verdrängte Luft, fliegt er. Das Wort „Luftschiff“ ist also tatsächlich wörtlich zu nehmen – ein Schiff, das in der Luft „schwimmt“<sup>1</sup>.

Die Wirksamkeit der Tragkraft nimmt jedoch ab, je höher ein Ballon oder Luftschiff steigt. Grund dafür ist, dass die Dichte der Umgebungsluft mit zunehmender Höhe geringer wird. Die Tragkraft nimmt auch ab, je höher die Umgebungstemperatur im Vergleich zur Traggastemperatur ist. Umgekehrt steigt die Tragkraft, wenn die Traggastemperatur höher als die Umgebungstemperatur ist. Dies ist das Funktionsprinzip von Heißluftschiffen und -ballons. Je 10 °C Temperaturunterschied verändert sich die Tragkraft um 3,5 Prozent (Hallmann 2002).

Um eine konstante Tragkraft in allen Höhen zu realisieren, sollte das Traggas mit zunehmender Höhe sein Volumen vergrößern können (anders formuliert: das Verhältnis von Luft- zur Traggasdichte bleibt konstant). Hierzu wird ein Teil des Innenraums des Luftschiffs mit Luftsäcken (sog. Ballonets) gefüllt (s. Abb. 1). Beim Aufstieg wird diese (schwerere) Luft abgelassen und durch das sich mit dem Aufstieg ausdehnende (leichtere) Traggas (z. B.

<sup>1</sup> Sowohl für Schiffe im Wasser als auch für solche in der Luft gilt das physikalische Gesetz von Archimedes (285–212 v. Chr.). Nach dem archimedischen Prinzip ist der Auftrieb gleich der Gewichtskraft des verdrängten Mediums, hier der Luft.

Abbildung 1

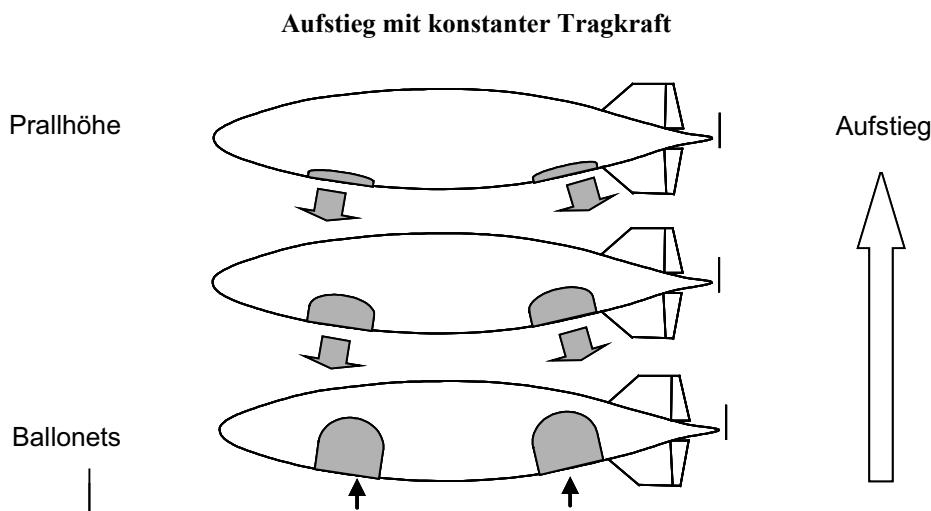
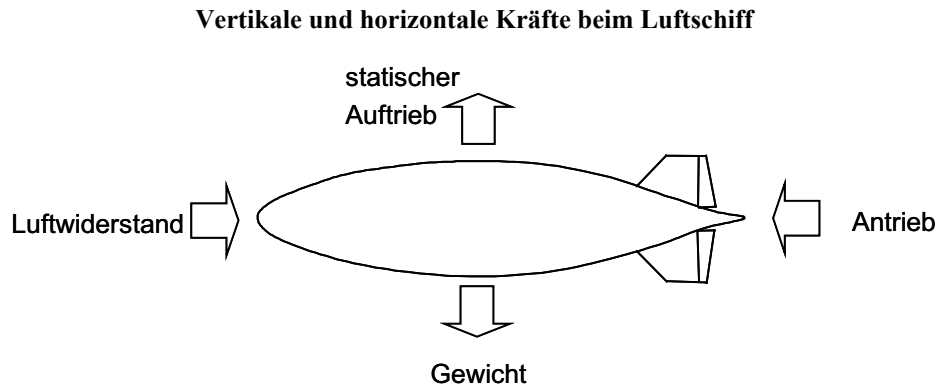




Abbildung 2



Quelle: Kröplin 2003, S. 6

Helium) verdrängt. Ist der gesamte Innenraum der Luftschiffhülle mit Traggas gefüllt, spricht man von der Prallhöhe. Bei einem weiteren Aufstieg würden wegen des Überdrucks des Traggases Spannungen in der Hülle entstehen, oder es müsste Traggas abgelassen werden. Unterhalb der Prallhöhe halten sich der statische Auftrieb und die Gewichtskraft des Luftschiffs die Waage (s. Abb. 2).

Neben dem ausschließlich vertikal wirkenden Auftrieb wird ein horizontaler Antrieb für den Vortrieb benötigt (i. A. Propellerantrieb). Steuerung und Änderung der Flughöhe erfolgen bei Fahrt durch Ruder, beim Stehen in der Luft „auf der Stelle“ (sog. Hovern) durch Steuertriebwerke. Die Flugstabilität wird durch passive Leitwerke hergestellt.

Gegenüber anderen Flugtechnologien zeichnet sich die LaL-Technologie damit durch eine Besonderheit aus: Sie besitzt mit dem Auftrieb ein natürliches Potenzial zum Fliegen, ohne dass hierfür eine Energiezufuhr erforderlich ist.

## 1.2 Nutzungsaspekte des natürlichen Auftriebspotenzials

Um die Einsatzmöglichkeiten von LaL-Systemen im heutigen Luftverkehr besser einschätzen zu können, ist es erforderlich, deren betriebstechnische Besonderheiten zu beachten. Aus der optimalen Nutzung des Auftriebs ergeben sich vergleichsweise niedrige Flughöhen (bis ca. 3 000 m) und eher geringe Fluggeschwindigkeiten<sup>2</sup>. Allerdings ist die optimale Nutzung des natürlichen statischen Auftriebs an die adäquate Berücksichtigung von mehr oder weniger beeinflussbaren Randbedingungen gebunden, wie die Höhe der Nutzlast oder die Wahl der Flugrouten. Einige dieser Aspekte und Wechselwirkungen sind im Folgenden aufgeführt.

### Zuladung als Funktion der Bauweise

Um den natürlichen Auftrieb von Luftschiffen zu nutzen, ist es notwendig, die Gegenkraft, also das Gewicht, relativ genau zu bestimmen. Um ein Gleichgewicht aller Massen herzustellen, müssen Luftschiffe vor jedem Einsatz „ausgewogen“ werden. Dem Auftrieb, der proportional des Gewichts der verdrängten Luft ist, wirken die folgenden Massen entgegen:

- das Auftriebsgas (Helium oder Wasserstoff),
- die Struktur (Leermasse),
- ggf. das Ballastgas (i.d.R. Luft in den Ballonets),
- die Betriebsmittel (Treibstoffe usw.) und
- die eigentliche Nutzlast.

Auftriebsgas, Leermasse und Ballastgas bestimmen zusammen die Zuladung, die aus Betriebsmitteln und Nutzlast besteht. Die Mengen von Ballastgas, Betriebsmitteln und Nutzlast können zur bestmöglichen Erfüllung der jeweiligen Flugaufgabe unterschiedlich gewichtet werden. Daraus ergibt sich als eine zentrale Aufgabe, einen möglichst leichten Luftschiffkörper zu bauen, um eine hohe Kapazität für die Nutzlast verfügbar zu haben.

### Reichweiten als Funktion der Flughöhe

Das Verhältnis von Ballastgas zu Treibstoff kann flugrountenspezifisch verändert werden. Zum Beispiel kann ein Luftschiff eine Nutzlast über eine große Reichweite transportieren, indem es in geringer Höhe über dem Meer fliegt und dabei wenig Ballastgas und viel Treibstoff an Bord hat. Dasselbe Luftschiff könnte für eine Gebirgsüberquerung mit viel Ballastgas und wenig Treibstoff ausgerüstet werden, um den Höhengaufstieg durch Ablassen von Ballastgas zu ermöglichen (Kröplin 2003, S. 4).

### Flugrouten als Funktion möglicher Klimabedingungen

Bei der Missionsplanung von Luftschiffen ist auf Klimabedingungen Rücksicht zu nehmen. Optimale Flugrouten

<sup>2</sup> Der offizielle Geschwindigkeitsrekord für Luftschiffe liegt bei 111,8 km/h und wurde kürzlich mit einem Zeppelin NT aufgestellt (Spiegel Online 2004).

liegen in niedriger Höhe (mit hohem Auftrieb) etwa über dem Meer oder in Flusstälern. Der Auftrieb wird physikalisch gesehen ungünstiger über heißen Gebieten (z. B. Wüsten) und besser über kühleren Regionen (z. B. Polargebiete). Damit ergeben sich hier bereits deutliche Einschränkungen bei möglichen längeren Flugrouten.

Als Größenordnung für den Auftrieb – über unterschiedliche Klimazonen (Abb. 3) gemittelt – wirken etwa zwischen 1,1 kg bis 1,4 kg pro Kubikmeter verdrängter Luft in Meereshöhe; in 20 km Höhe wirken mit  $0,1 \text{ kg/m}^3$  jedoch nur noch 8 Prozent davon. Erhöht sich beispielsweise die Umgebungstemperatur um  $1 \text{ }^\circ\text{C}$ , so verändert sich der statische Auftrieb für ein Luftschiff mit  $20\,000 \text{ m}^3$  Verdrängung um etwa 80 kg (Kröplin 2003, S. 5). Der Auftrieb ist – neben der Höhe – auch noch von weiteren Faktoren, wie das verwendete Traggas, abhängig.

### Meteorologische Aspekte und Allwettertauglichkeit

Luftschiffe können grundsätzlich allwettertauglich ausgerüstet werden. Für militärische Anwendungen (Langzeitüberwachung über dem Meer) wurden zum Nachweis der Allwettertauglichkeit in den 1950er-Jahren Tests durchgeführt (dreijähriges Demonstrationsprogramm mit dem ZPG-2 Prallluftschiff der US Navy). Dabei wurde festgestellt, dass eine kontinuierlich besetzte Überwachungsstation über dem Atlantik unter allen Wetterlagen machbar erscheint, Vereisungen unkritisch für Ausdauerflüge sind und die Bodenhandhabung in fast allen Wetterlagen möglich ist (Kröplin 2003, S. 25).

Für viele zivile Nutzungen können solche weit reichenden Anforderungen anders gewichtet werden. So können z. B. Touristenfahrten im Winter ausgesetzt oder Starkwindgebiete durch meteorologische Navigation umflogen werden. Dazu gehören auch die Durchführung von Bodenoperationen nur zu turbulenzarmen Tageszeiten (morgens, abends) sowie der saisonbedingte Wechsel der Operationsgebiete (Kröplin 2003, S. 25).

Da Luftschiffe von den meteorologischen Umgebungsbedingungen wesentlich mehr beeinflusst werden als Flugzeuge, kommt die heutige meteorologische Praxis mit einer verbesserten Voraussage der Wetterbedingungen für praktisch alle Bereiche der Erde über mindestens 12 bis 24 Stunden dem Betrieb von Luftschiffen entgegen. Für Luftschiffe sind meteorologische Vorhersagen bis zu drei Tagen sinnvoll – etwa zur Bestimmung des statischen Auftriebs, der Fahrhöhe, der zulässigen Ladung, der Fahrtroute bzw. der Fahrdauer.

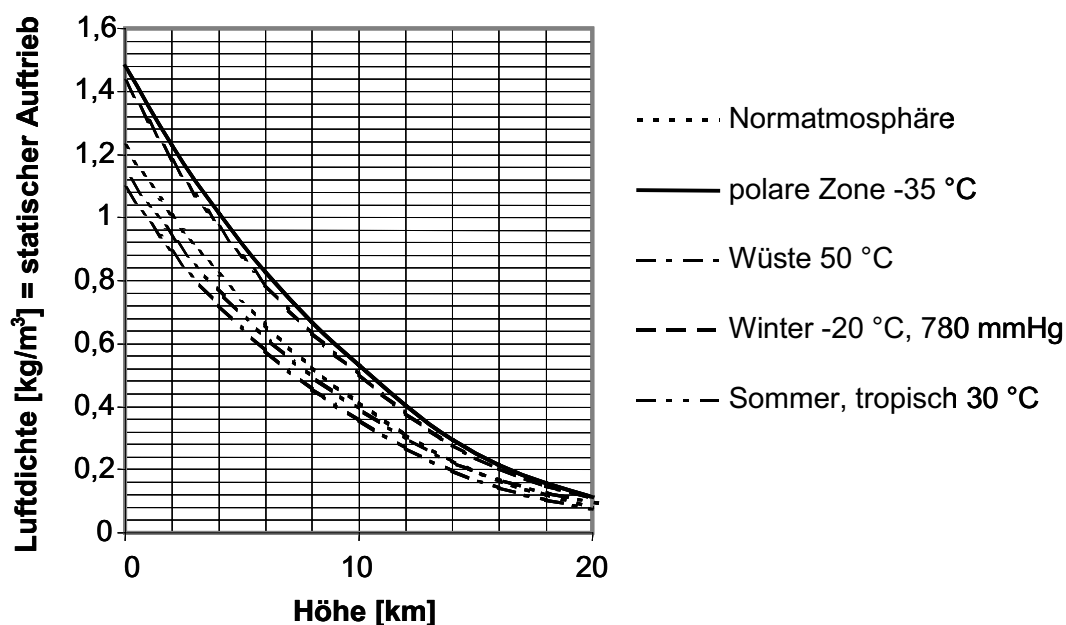
Im Hinblick auf die Planung von Stratosphären-Plattformen besteht Forschungsbedarf, was die atmosphärischen Bedingungen in den entsprechenden Höhen (lokale Windverteilungen etc.) anbelangt. Das diesbezügliche Wissen ist gegenwärtig sehr lückenhaft.

### Meteorologische Navigation

Luftdruckunterschiede (Wind) führen zu horizontalen und vertikalen Kräften, die Einfluss auf die Flugstabilität eines Luftschiffs haben können. So können z. B. lokale thermische Winde entstehen, etwa durch aufsteigende Warmluftblasen. An Berghängen kann die Thermik zu

Abbildung 3

Luftdichte in Abhängigkeit der Höhe, Klimazone und Wetterlage



Berg- oder Talwinden führen, die ein gesamtes Tal erfassen können. Da Luftschiffe eine relativ große Angriffsfläche haben, können je nach Turbulenzgröße kleinere Luftschiffe mitgerissen werden, während bei großen Luftschiffen mit erheblichen Strukturbelastungen zu rechnen ist (Kröplin 2003, S. 30).

Da Reisefluggeschwindigkeiten von 60 bis 90 km/h (bzw. Maximalfluggeschwindigkeiten von 90 bis 130 km/h) die auftretenden Windgeschwindigkeiten von 35 bis über 70 km/h nicht wesentlich übersteigen, spielt der Wind eine bedeutende Rolle für die Flugleistungen<sup>3</sup>. Die Windgeschwindigkeit nimmt zunächst mit der Höhe zu. Deshalb ist es günstig, mit geringem Bodenabstand zu fliegen. Beispielsweise operieren große Starrluftschiffe meist ein bis eineinhalb Schiffslängen (etwa 230 bis 350 m) über der Erdoberfläche.

Oberhalb der Bodengrenzschicht nimmt der Wind erst ab etwa 10 km Höhe wieder ab, bis er in 20 km Höhe ein Minimum erreicht. Eine Flughöhe von 20 km ist daher ideal für Luftschiffe, die in der Stratosphäre operieren sollen.

Um Hoch- und Tiefdruckgebiete herum bewegt sich der Wind spiralförmig, so dass partiell günstige Rückenwinde entstehen, die gezielt ausgenutzt werden können, aber auch Gegenwinde, die die Fahrt ungünstig beeinflussen können. Als günstig erweisen sich Operationen entlang von Isobaren (Linien gleichen Luftdrucks).

Bei dieser Art der Routenplanung (sog. meteorologische Navigation) fährt das Luftschiff zwar „auf Umwegen zum Ziel“, dafür jedoch zumeist mit Rückenwind. Bei Langstreckenfahrten wird demnach zwar ein festgelegter Kurs verfolgt, allerdings werden gewöhnlich Gewitterfronten umfahren oder Luftschiffe bei herannahendem Sturm kurzfristig aus dem Gebiet ausgeflogen. Bei Kurzstreckenfahrten, während Überwachungs- und Patrouilleflügen sowie bei Werbe- und touristischen Rundflügen können windideale Rundbahnen abgefahren werden.

## 2. Stand der Technik

Zur Charakterisierung des Standes der Technik von Luftschiffen soll ein Überblick über verschiedene Bauformen sowie über wesentliche Systemkomponenten und daraus resultierendem Entwicklungsbedarf gegeben werden. Eine Zusammenstellung ausgewählter, repräsentativer Luftschiffprojekte – auch aus historischer Sicht – findet sich im Anhang. Die Ausführungen basieren im Wesentlichen auf Kröplin 2003, Hallmann 2002, Zeppelin 2003 und Mandel 2003.

### 2.1 Typische Bauformen

Die Grundkonzepte heutiger LaL-Projekte weisen immer noch einen deutlichen Bezug zum technischen Stand des letzten Jahrhunderts auf. So bestimmt noch immer die Zigarrenform das typische Luftschiff, obwohl nicht sicher ist, ob damit ein Optimum aus Widerstand und Auf-

<sup>3</sup> Zum Vergleich: Ein Flugzeug, welches mit 900 km/h in einen Gegenwind von 100 km/h fliegt, kommt noch mit 800 km/h vorwärts; ein Luftschiff dagegen mit 120 km/h nur noch mit 20 km/h (Kröplin 2004).

triebserzeugung erreicht wird. Auch die Technik der Druckregulierung die, zumindest bei Prallluftschiffen, mit Hilfe der Ballonets erfolgt, ist nicht wesentlich weiter entwickelt oder durch andere Techniken ersetzt worden. Zwar gibt es hierzu Ideen, doch stehen diese Konzepte noch am Anfang (Mandel 2003).

#### 2.1.1 Aerostaten

Aerostaten (oder Fesselballone) weisen eine permanente Verankerung mit dem Boden oder einem Schiff auf. Sie werden in begrenztem Umfang für militärische und hoheitliche Aufklärungsaufgaben in Betriebshöhen zwischen 300 m und maximal 5 000 m (bis zu 30 Tage) eingesetzt. Die Nutzlast heutiger Groß-Aerostaten liegt zwischen 2 500 kg in niedrigen und 1 500 kg in größeren Höhen; sie besteht hauptsächlich aus Rundlicht-Radaranlagen und weiteren Anlagen zur militärischen und zivilen Funküberwachung (Zeppelin 2003, S. 5).

Aerostaten sind bei vergleichbarer Nutzlast in der Regel größer als Luftschiffe, da sie neben Eigengewicht und Nutzlast zusätzlich noch das Gewicht des Verankerungskabels tragen müssen. Die derzeit größten angebotenen Aerostaten haben ein Volumen von etwa 16 000 m<sup>3</sup> bei einer Länge von 71 m (Zeppelin 2003, S. 5).

Das Verankerungskabel enthält Strom- und Datenleitungen zur Versorgung des Aerostaten und der Aufklärungsnutzlast und dient als Blitz- und Elektrostatikableiter; es sollte extrem leicht und dennoch auch bei großen Betriebshöhen reißfest sein. Hier wird in absehbarer Zukunft wenig Fortschritt erwartet (Zeppelin 2003, S. 5).

Die Bodeneinrichtung besteht – je nach Größe des Aerostaten – aus Verankerungsmast und –gestell, Winde, Generatoren und Bedieneinrichtungen. Bis etwa 7 000 m<sup>3</sup> Volumen sind heutige Aerostaten noch begrenzt mobil einsetzbar (in der Regel über Schiffen); darüber hinaus gibt es generell nur stationäre Einrichtungen (Zeppelin 2003, S. 5). Nachteilig beim Betrieb der Aerostaten ist die – wegen des Verankerungskabels – erforderliche Schaffung eines Schutzbereiches (Sperrgebietes) für den Luftverkehr um den Auflasstandort herum.

Bei Großaerostaten gibt es wetterbedingt immer wieder Verluste. Die Einsatzdauer heutiger Aerostaten ist hauptsächlich durch den Heliumverlust der Hülle begrenzt; zum Teil auch durch die Energieversorgung und Wartungsmaßnahmen.

#### 2.1.2 Bauweisen von Luftschiffen

Neben vielen Sonderformen gibt es bei Luftschiffen drei klassische Bauweisen: das unstarre Prall-, das Starr- und das halbstarre Luftschiff.

##### Pralle Luftschiffe

Prallluftschiffe (Blimps) verkörpern die älteste Luftschiffbauart. Sie besitzen keine tragende innere Struktur. Ihre Form wird durch entsprechenden Zuschnitt der Hülle und einem leichten Innenüberdruck (ca. 5 Millibar) aufrechterhalten. Alle Teile (Gondeln, Nutzlasten, Leit- und Triebwerke etc.) sind direkt an der Hülle befestigt. Um

Abbildung 4

**Aerostat (TCOM-32-M) mobil auf einem Schiff stationiert**



Quelle: Zeppelin 2003, S. 6, TCOM (Internet)

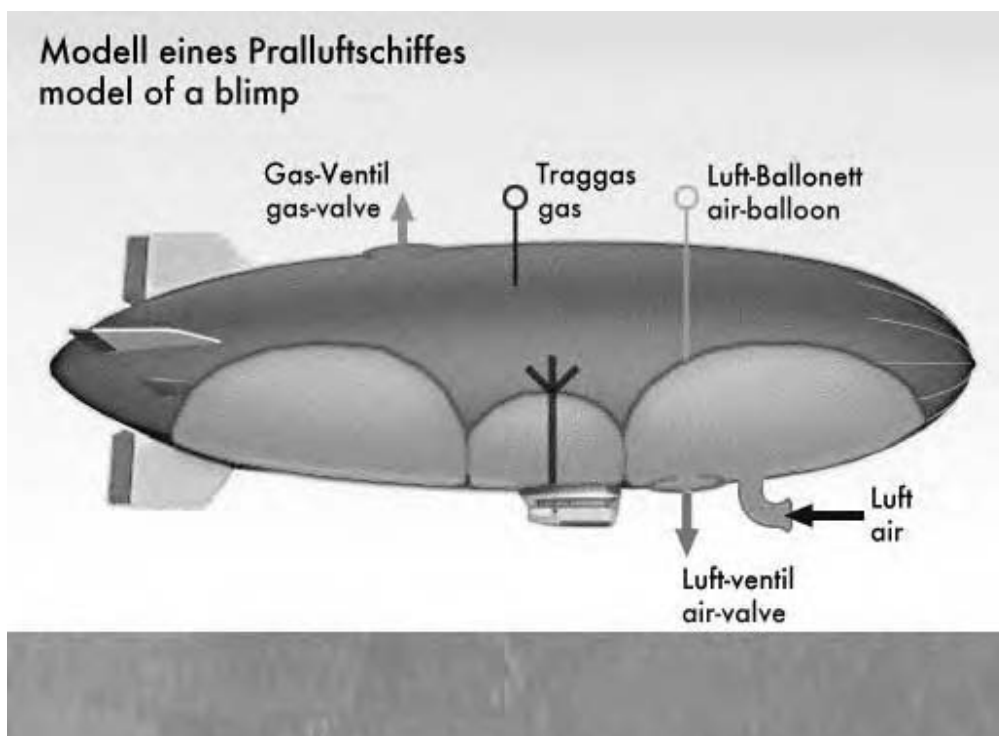
einem möglichen „Knick“ in der Hülle bei ungleichmäßiger Gewichtsverteilung vorzubeugen, werden ausragende Teile (wie Leitwerke) zumeist durch Spannseile abgestützt oder schwere Teile (wie Gondeln) zusätzlich über Seilgalerien am oberen Teil der Hülle befestigt.

Zur Aufrechterhaltung des Innendruckes bei Veränderungen des Außendruckes oder des Traggasvolumens (durch

Höhen- oder Temperaturänderung) werden eine bis drei luftgefüllte Blasen im Inneren der Hülle (sog. Ballonets) mitgeführt. Bei Außendruckab-/Traggasvolumenzunahme (z. B. im Steigflug) wird über Ventile Luft aus den Ballonets abgelassen, bei Außendruckzu-/Traggasvolumenabnahme wird (z. B. über separate Gebläse) Luft wieder in die Ballonets eingeblasen (Abb. 5).

Abbildung 5

**Funktionsprinzip eines Prallluftschiffes**



Quelle: Zeppelin 2003

Die Prall-Luftschiffbauweise ist die leichteste Bauweise überhaupt, da die gasdichte Hülle gleichzeitig Strukturaufgaben übernimmt und außer Gondel und Leitwerken neben der Hülle fast keine Bauelemente vorhanden sind. Daher eignet sich diese Bauweise sehr gut für kleine Luftschiffe. Die Motoren sind meistens an der Gondel befestigt. Als Leitwerke kommen starre und pneumatische Strukturen zur Anwendung.

Die heutigen Prallluftschiffe sind für die üblichen Einsatzzwecke (Werbung, gelegentliche Passagierflüge, Fernsehkameraplattform für Sportereignisse) einfache aber ausgereifte, technisch nicht sehr anspruchsvolle Geräte. Ihr Betrieb ist bei kleinen Luftschiffen problemlos, jedoch bei größeren recht aufwendig. Technologische Fortschritte sind zu erwarten bei Fly-by-wire-Flugsteuerungen<sup>4</sup>, bei der Verbesserung der aerodynamischen Stabilität und Steuerbarkeit, bei sparsameren Antrieben (z. B. Dieselmotoren) sowie bei den Hüllenmaterialien.

### Starre Luftschiffe

Unter dem Begriff „Starre Luftschiffe“ werden Luftschiffe zusammengefasst, deren aerodynamische Form durch eine fast Innendruck-lose, nicht gasdichte, mit Stoff bespannte Struktur gebildet wird und deren statischer Auftrieb durch mehrere Traggaszellen im Innern der Struktur erzeugt wird.

Hauptvertreter dieser Gattung waren die Luftschiffe der klassischen Zeppelin-Bauart, aber auch Luftschiffe anderer Hersteller wie Schütte-Lanz GmbH (Deutschland), Vickers-Werke (Großbritannien) oder Goodyear-Zeppelin Co. (USA). Insgesamt wurden weit über 100 Luftschiffe dieser Gattung zwischen 1900 und 1939 gebaut. Das letzte starre Luftschiff, die „Graf Zeppelin II“, wurde 1939 außer Dienst gestellt. In den letzten Jahren wurde u. a. in den Niederlanden durch die Firma Rigid Airship versucht, diese Bauart wieder zum Leben zu erwecken. Das Projekt scheiterte jedoch an mangelnder Finanzierung (Zeppelin 2003, S. 13).

Starre Luftschiffe sind auf Grund ihres Gewichtes gegenüber den halbstarren oder den Prallluftschiffen immer im Nachteil. Dieser tritt bei sehr großen Luftschiffen jedoch nicht so deutlich in Erscheinung, da der prozentuale Anteil der Struktur an der gesamten Flugmasse mit zunehmender Schiffsgröße geringer wird. Andererseits weisen starre Luftschiffe deutliche Vorteile hinsichtlich ihrer Betriebssicherheit auf. So werden größere Lasten (Leitwerk, Antrieb, Nutzlast etc.) durch eine Struktur getragen, die nach Fail-Safe-Prinzipien<sup>5</sup> ausgelegt sein kann. Durch die Verwendung vieler Gaszellen als Auftriebskörper ist bei Gasverlust aus einer Zelle die Gefahr

für das Gesamtluftschiff deutlich geringer (dies entspricht etwa den Querschotten eines Schiffes) als bei Verwendung nur einer Gaszelle, wie z. B. bei Prallluftschiffen. Speziell bei größeren Luftschiffen zur Personenbeförderung könnte diese Bauweise zukünftig wieder interessant werden, vor allem, wenn sie in Verbindung mit modernen Struktur- und Hüllenwerkstoffen (Faserverbundwerkstoffe, hochfeste Leichtmetalle, Kunststoffe) sowie Antriebs- und Steuerungskonzepten (Schubvektorsteuerung, Fly-by-wire/Power-by-wire) konzipiert wird.

### Halbstarre Luftschiffe

Schwierig zu charakterisieren ist die Gruppe der halbstarren Luftschiffe. Am ehesten sind darunter Luftschiffe zu verstehen, deren äußere Form durch den Innendruck der Hülle erzeugt wird, die aber zusätzlich eine, wie auch immer geartete feste Struktur zum Tragen von Nutzlasten aufweist. Diese Struktur besteht oft aus einem festen Kiel entlang der Längsachse (sog. Kiel-Luftschiffe). Die bekanntesten Vertreter der Kiel-Luftschiffe waren die Schiffe des italienischen Generals Nobile (z. B. „Italia“ und „Norge“), mit denen in den 1920er-Jahren die nördlichen Polarregionen erstmals mit Luftfahrzeugen erforscht wurden sowie das projektierte CargoLifter-Luftschiff (Abb. 6). Ein anderes Strukturkonzept in Form einer Trägerstruktur im Inneren der Hülle wurde z. B. beim Zeppelin NT verfolgt (Abb. 7).

Die Tragstruktur dient dazu, Einzellasten, wie Fracht oder auch Triebwerke über eine größere Länge mit der Hülle zu verbinden, an der der statische Auftrieb entsteht. Halbstarre Luftschiffe können bis zu einem gewissen Grad auch drucklos fliegen, haben also gegenüber Prallluftschiffen einen Sicherheitsvorteil. Ihre Tragstruktur ist jedoch kleiner und leichter als die eines Starrluftschiffes, so dass diese Bauweise für mittelgroße Luftschiffe gut geeignet ist. Zum Druckausgleich sind beim Aufstieg auch hier Ballonets erforderlich.

Halbstarre Luftschiffe sind durch die Innenstruktur auch bei einem größeren Leck in der Hülle weiterhin mehr oder weniger eingeschränkt steuerbar und weisen damit eine höhere Betriebssicherheit als einfache Prallluftschiffe auf.

Die halbstarre Bauweise erlaubt durch die Anordnung der Antriebe und Leitwerke an der starren Struktur (in Verbindung mit z. B. Fly-by-Wire-Steuerungen) eine bedeutend bessere Steuerbarkeit in der für jedes Luftfahrzeug kritischen Phase der Start- und Landung. Gleiches ließe sich mit starren Luftschiffen auch erreichen, jedoch mit einem höheren Strukturgewichtsanteil. Technologische Fortschritte sind – ähnlich wie bei den Prall- und starren Luftschiffen – in der Steuerung, im Antriebsbereich und bei den verwendeten Materialien (Konstruktion und Hülle) zu erwarten.

### Hybride und andere Sonderformen

Bei einem Hybridluftschiff wird nur ein Teil des Gesamtgewichtes durch den statischen Auftrieb getragen; der

<sup>4</sup> Fly-by-Wire (sinngemäß: „Fliegen per Draht“) ist eine Steuerungstechnik für Luftfahrzeuge, die – im Unterschied zur klassischen Steuerung durch Stahlseile oder Schubstangen – über elektrische Signale an die Ruder/Rotoren erfolgt. Dadurch lassen sich Flugkontroll-Computer einsetzen.

<sup>5</sup> Das Fail-Safe-Prinzip bedeutet, dass bei Ausfall einer Funktion oder einem auftretenden Fehler (fail) das System in einen sicheren (safe) Zustand übergehen soll.

Abbildung 6

**Ein Entwurfsbild des Kiel-Luftschiffes CargoLifter**



Quelle: Zeppelin 2003, S. 12

Abbildung 7

**Tragstruktur eines halbstarren Luftschiffs (Zeppelin LZ N07)**



Quelle: Zeppelin 2003, S. 13

Rest wird durch aerodynamischen Auftrieb von Hilfsflügeln, vom Rumpf selbst oder durch Schuberzeuger (Propeller und Rotoren) ergänzt. Ziel ist es, Vorteile von Luftschiffen/Ballonen (v. a. statischer Auftrieb zum Heben einer Nutzlast) mit denen von Flugzeugen/Hubschraubern (v. a. hohe Fluggeschwindigkeit) zu kombinieren. Bei der Mehrzahl der Projekte handelt es sich um Luftfahrzeuge zum Frachttransport (vor allem für sehr hohe Nutzlasten), in geringerem Umfang werden diese aber auch als fliegende Kräne konzipiert. Allen Hybridluftschiff-Projekten gemeinsam ist ihre enorme Größe mit Nutzlasten bis zu 1 000 Tonnen (Zeppelin 2003, S. 16).

Ein Beispiel für ein aktuelles Hybridluftschiff ist der ‚SkyCat‘ (Advanced Technology Group (ATG), Großbritannien), von dem derzeit ein ferngesteuert fliegender Erprobungsträger im Modellmaßstab 1 : 7 existiert. Der ‚SkyCat 1000‘ soll in der Lage sein, 1 000 Tonnen Nutzlast über eine Entfernung von mehr als 11 000 km zu transportieren (Zeppelin 2003, S. 16). Alle aerodynamischen Hybridluftschiffe benötigen Start- und Landeflächen großen Ausmaßes. Die Start-/Landestrecken sind zwar im Vergleich zu Flugzeugen kleiner. Da Luftschiffe aber stets gegen den Wind starten bzw. landen, benötigen sie einen ‚Landekreis‘ statt einer Landebahn.

Über das Projekt- oder Demonstrator-Stadium mit verkleinerten Modellen ist noch keines dieser Luftschiffe hinausgekommen. Zu lösende Probleme bei der Entwicklung von Hybridluftschiffen liegen vor allem in der Aerodynamik des Rumpfes sowie den sehr großen Leichtbau- und Stoffstrukturen.

### 2.1.3 Stratosphären-Plattformen

Stratosphären-Plattformen sind unbemannte Luftschiffe, die mit einer Zuladung (Sensoren etc.) in großer Höhe

(20 km) längere Missionen durchführen sollen. Dies erfordert eine teilweise völlig unterschiedliche Konzeption als bei tief fliegenden Luftschiffen. Beispielsweise sind die Anforderungen, die an den Struktur-Leichtbau und die Dichtheit der Hülle gestellt werden, hier wesentlich höher als bei anderen Luftschiffentypen.

Der Auftrieb wird durch ein Traggas realisiert, und es wird keine weitere an Bord befindliche Leistung benötigt. Mit der installierten Motorleistung müssen Stratosphären-Plattformen lediglich gegen den Wind positioniert (sie sollen stationär über einem Ort ‚stehen‘) und der Betrieb der Nutzlast gewährleistet werden. Solche Plattformen sind sowohl für zivile Anwendungen (Kommunikation) als auch für militärische Zwecke (Überwachung) interessant.

Der Einsatz von Stratosphären-Plattformen ist nur dort sinnvoll, wo die Wetter- und Windbedingungen einen annähernd geostationären Betrieb zulassen. Da in diesem Bereich bis ca. 20 km Höhe (zumindest auf der Nordhalbkugel) teilweise extreme Windbedingungen mit Geschwindigkeiten bis zu 200 km/h vorherrschen, ist ein Einsatz von Luftschiffen hier nicht möglich. Zwischen 20 km und 25 km Höhe (Stratosphäre) herrschen dagegen Windverhältnisse vor, die einen Einsatz von Stratosphären-Luftschiffen möglich machen.

Ein innovatives Konzept, bei dem die Nutzlast nicht von einem einzigen Auftriebskörper, sondern von mehreren kleinen miteinander verbundenen aufgenommen wird, ist der ‚Luftwurm‘ (Abb. 8). Der Vorteil liegt darin, dass die Biegemomente bei kleineren Baulängen deutlich kleiner sind und somit das Material leichter gewählt werden kann. Beim Auf- und Abstieg inklusive Start und Landung wirkt sich jedoch die Aufgliederung eher negativ aus.

Abbildung 8

#### Stratosphären-Luftschiff-Konzept der Universität Stuttgart



## 2.2 Umwelt und Sicherheit

### Umweltaspekte

Die heute operierenden Luftschiffe sind vergleichsweise emissionsarme und damit umweltfreundliche Verkehrsträger. Im Gegensatz zu anderen Luftfahrzeugen können sie in der Luft schweben, ohne Energie zu verbrauchen und bewegen sich mit relativ geringer Geschwindigkeit (meist kleiner als 80 bis 100 km/h) fort.

Auf Grund der geringen installierten Motorleistung liegen Abgas- und Außenlärmemissionen deutlich niedriger als bei anderen Luftfahrtgeräten (Zeppelin 2003, S. 81). Allerdings sind die eingesetzten Motoren oftmals nicht für den Luftschiffeinsatz optimiert und werden z. B. über weite Strecken im energetisch und emissionsseitig ungünstigen Teillastbereich betrieben. Teilweise wird – mangels Alternative – immer noch verbleiteter Kraftstoff eingesetzt.

Ressourcenverbrauch und Emissionen, die im gesamten Lebenszyklus eines Luftschiffes (Herstellung, Betrieb, Entsorgung) anfallen, wurden im Sinne einer Ökobilanz bisher nicht ermittelt. Hier besteht Forschungsbedarf.

Ob die aus heutiger Sicht insgesamt – trotz der teilweise fehlenden Daten – positive Einschätzung der Umwelteigenschaften auch für neu zu entwickelnde Großluftschiffe zutrifft, kann erst nach differenzierter Analyse des konkreten Anwendungsfalls gesagt werden, da z. B. der Energiebedarf beim Betrieb eines Luftschiffs entscheidend von einer Reihe von Parametern abhängt:

So erzeugt ein größerer Querschnitt mehr Luftwiderstand und damit einen höheren Energiebedarf. Ebenso steigt der Energiebedarf, wenn die zu erreichende Reisegeschwindigkeit höher gewählt wird und wenn diese auch unter schwierigen Witterungsbedingungen (z. B. starker Gegenwind) erreicht werden soll. Nicht zuletzt hängt der Energieverbrauch im praktischen Einsatz eines Luftschiffs auch von den Betriebsszenarien ab, z. B. wenn der Flug häufig im Teillastbereich der Motoren bzw. Turbinen stattfindet.

Der Betrieb von Luftschiffen könnte nahezu emissionsfrei gestaltet werden, wenn es gelänge, regenerative Energien (Solarzellen, regenerativ erzeugter Wasserstoff, Brennstoffzellen) in das Antriebssystem zu integrieren. Ein Dauereinsatz von Luftschiffen in der Stratosphäre, wäre ohne regenerative Technologien nur schwer vorstellbar.

Da nahezu alle nichtmilitärischen Einsatzgebiete von Luftschiffen aus heutiger Sicht Nischenmärkte sind, ist mit einer nennenswerten Substitution von konventionellen Verkehrsträgern und einer merklichen Reduktion der verkehrsbedingten Gesamtemissionen gegenwärtig nicht zu rechnen.

### Sicherheitsaspekte

In der LaL-Szene wird häufig das Argument „Luftschiffe sind sicher“ verwendet und durch die geringe Anzahl schwerer Luftschiffunfälle begründet. Prinzipiell gesehen

sind Luftschiffe nicht per se sicherer als Flugzeuge (Mandel 2003, S. 22 ff.). Hauptgefahren für LaL-Systeme sind der Verlust des Auftriebgases sowie die Entstehung eines Brandes.

Eine wesentliche Gefahr bei Luftschiffen ist der Verlust des Auftriebs. Das Prinzip heutiger Luftschiffe besteht darin, nur einen geringen Überdruck in der Luftschiffhülle zu halten. Der Vorteil liegt darin, dass selbst bei Beschädigung der Luftschiffhülle kein schlagartiges Entweichen des Traggases oder gar ein „Platzen der Hülle“ stattfindet, sondern dass die Hülle lediglich drucklos wird und das Traggas nur langsam entweicht. Ist die Beschädigung auf der Unterseite eines Luftschiffes so kann sich, durch den natürlichen Auftrieb des Heliums, das Gas meist lange in der Hülle halten. Dadurch wird die Gefahr eines abrupten Absturzes drastisch verringert.

Ein beschädigtes Schiff erfährt so einen langsamen Auftriebsverlust und sinkt mit relativ geringer Geschwindigkeit zu Boden. Die Energien, die durch einen Aufprall am Boden erzeugt werden, wären gering. Für Besatzung und Passagiere wäre damit eine hohe Überlebenswahrscheinlichkeit gegeben – zumindest bei Luftschiffen, die in geringen Höhen operieren. Für Stratosphären-Luftschiffe ist dies gegenwärtig fraglich, da eher davon ausgegangen werden muss, dass das Traggas nach einer gewissen Zeit vollständig entwichen ist und es dann zu einem heftigen Absturz des Gerätes kommen könnte. Hier müssten noch spezielle Systemauslegungen gefunden werden, die dieses verhindern.

Eine andere Art von Unfällen entsteht durch Brände. Diese gab es zwar eher bei Heißluft-Ballonen (durch Entzündung der Ballonhülle mit der Brenner-Flamme). Prinzipiell kann dieses Szenario auch für ein Luftschiff gelten, da es i.d.R. leicht entzündliche und/oder explosive Stoffe an Bord gibt (z. B. Kraftstoff), die als Brandquellen dienen könnten. Genaue Untersuchungen zu möglichen Brandausbreitungsszenarien gibt es nicht. Dies gilt auch für das Risiko, von einem Blitz getroffen zu werden. Neben der Gefahr eines Brandes ist dabei auch die Beschädigung der Hülle nicht auszuschließen.

In heutigen Luftschiffen wird zumeist unbrennbares Helium als Traggas verwendet. Falls Wasserstoff eingesetzt werden soll, sind besondere konstruktive Brandschutzmaßnahmen unerlässlich. Wie groß die potenziellen Gefahren des Wasserstoff-Einsatzes in Luftschiffen sind, ist in der Literatur umstritten (Bain et al. 2000, Dessler 2004).

Weitere potenzielle Gefahren gibt es für Luftschiffe am Boden, da sie v. a. bei starkem Wind schwer kontrollierbar werden können (Mandel 2003, S. 25). Diese Unfälle gehen überwiegend ohne Personenschaden vonstatten, führen aber meist zu schwerer Beschädigung, bis hin zum Verlust des Gerätes.

Bei Stratosphären-Plattformen die z. B. mit leistungsstarken Funkanlagen zur Telekommunikation ausgerüstet sind, besteht eine sicherheitsrelevante Problematik darin, dass diese Anlagen in der Regel nicht nach luftfahrtspezifischen Gesichtspunkten entwickelt und getestet wurden



und somit ihr mögliches Störpotenzial sowie ihre Verträglichkeit mit Luftfahrtgeräten noch zu klären wäre (elektromagnetische Verträglichkeit).

Aus dem bisher Gesagten ergibt sich in folgenden Punkten ein Bedarf an verbesserten Informationen:

- Emissionsbilanzen (z. B. Ökobilanz) von Luftschiffen bei Herstellung und Betrieb,
- Ausarbeitung von Gefahrenszenarien bei Verlust des Auftriebsgases für Stratosphären-Plattformen,
- Ausarbeitung von Gefahrenszenarien für Brände (unter Berücksichtigung der an Bord verfügbaren Komponenten),
- Untersuchungen zum Blitzeinschlag in Luftschiffen unter Brandschutzgesichtspunkten.

## 2.3 Systemkomponenten und Entwicklungsbedarf

Im Folgenden sollen ausgewählte Aspekte der technischen Einzelsysteme bzw. -komponenten thematisiert werden.

### 2.3.1 Hülle

Die Hülle ist eines der wichtigsten Bauteile eines Luftschiffes: Durch sie wird die äußere aerodynamische Form gebildet. Sie enthält zudem das Traggas für den aerostatischen Auftrieb (Forderung nach hoher Gasdichtheit). Ihre mechanische (tragende) Funktion ist insbesondere bei Prallluftschiffen stark ausgeprägt. Zudem hat sie eine Schutzfunktion gegenüber atmosphärischen Einflüssen (UV-Beständigkeit etc.). Gleichzeitig sollte das Gewicht der Hülle so gering wie möglich sein. Die maximale Festigkeit der Hülle bestimmt die maximale Größe des Luftschiffs bei nicht starren Bauweisen.

#### Materialien

Aus den genannten Aufgaben der Hülle lassen sich zunächst einige allgemeine Forderungen an moderne Hüllenmaterialien für Luftschiffe ableiten. Zur Realisierung der mechanischen Funktion werden insbesondere Materialien mit einer hohen Reißfestigkeit gefordert. Je nach Konstruktion macht das Hüllenmaterial etwa 3 bis 5 Prozent (oder mehr<sup>6</sup>) von der Gesamtmasse eines Luftschiffs aus (Bock/ Knauer 2003), so dass das Material ein niedriges Flächengewicht aufweisen sollte. Aus fertigungstechnischer Sicht wird eine möglichst gut Handhabbarkeit gefordert, etwa beim Verbinden einzelner Bahnen, beim Anbringen von Seilen zur Kraftverteilung, beim Verbinden von Kiel-, Gondel- und Leitwerkstrukturen sowie für einfache Reparaturmöglichkeiten. Um Traggasverluste zu minimieren, sollte das Material eine hohe Gasdichtheit aufweisen. Dazu kommen Forderungen nach Unbrennbarkeit bzw. Schwerentflammbarkeit.

<sup>6</sup> Bei CargoLifter CL 160 hätte der Masseanteil der Hülle voraussichtlich mehr als 15 Prozent betragen (Bock/Kauer 2003).

Am ehesten sind Verbundwerkstoffe geeignet, diese unterschiedlichen Anforderungen zugleich zu erfüllen. Dabei übernimmt jede Einzelschicht eine oder mehrere Funktionen: Die mechanische Festigkeit wird hauptsächlich durch das verwendete Gewebe bestimmt. Typisch sind z. B. Gewebe aus PET-Fasern (Polyethylenterephthalat), aber auch lineare Fasern (PA6, PA6.6) oder Aramid (aromatische Polyamide) (Bock/Knauer 2003). Mit dem Gewebeaufbau sind individuelle Konstruktionen herstellbar. Die Gasdichtheit wird üblicherweise mit PET-Folie erreicht, die wiederum nicht unerheblich zur mechanischen Festigkeit des Verbundes beiträgt. Um die verschiedenen Schichten (Folien und Gewebe) miteinander zu verbinden, haben sich elastische Polyurethan-Klebstoffe bewährt.

Besondere Bedeutung hat die Wechselwirkung der Hülle mit Wärme- bzw. UV-Strahlung. Auf Grund der meist sehr großen Oberfläche von Luftschiffen können unsymmetrische Erwärmungen der Luftschiffhülle, z. B. bei starker Sonneneinstrahlung, zu unkalkulierbaren Turbulenzen im Tragkörper führen (Bock/Knauer 2003). Vermindert werden kann dies durch eine helle Einfärbung der äußeren Hüllschicht. Zudem erhöht eine Metallisierung (z. B. eine dünne, aufgedampfte Aluminiumschicht) die UV-Beständigkeit des Hüllenmaterials und wirkt sich zudem positiv auf dessen Lebensdauer aus (Bock/Knauer 2003).

Bei kleineren Prallluftschiffen liegen Erfahrungswerte mit Polyestergeweben für den Hüllenbau vor, die auch in allen modernen Luftschiffen eingesetzt werden. Große Luftschiffprojekte (Schwerlasttransporter, Stratosphären-Plattformen), die deutlich größer als bisherige Luftschiffe sind<sup>7</sup>, erfordern meist noch festere und gleichzeitig leichtere Materialien als Polyester. Diese sind seit den 1970er Jahren auch verfügbar, weisen jedoch wiederum auch nachteilige Eigenschaften auf. Neben ihrem vergleichsweise hohen Preis, sind beispielsweise Aramide UV- und knickempfindlich, Polyethylene tendieren bei Langzeitbelastung zum Kriechen<sup>8</sup> und sind schwer verklebbar, Kohlefasern sind knickempfindlich. Zudem sind viele der hochfesten Fasern momentan nicht in den etwa für Stratosphären-Plattformen gewünschten Ausführungen (mengenmäßig) verfügbar, weil der Markt dafür zu klein ist. (nach Kröplin 2003)

Dennoch sind durch die Verwendung hochfester, leichter Fasern (Aramide, PBO<sup>9</sup>, Polyethylene, LCP<sup>10</sup>) prinzipiell deutliche Masseneinsparungen in der Hülle zu erreichen. Da diese Fasern jedoch auch steifer sind, ist eine sehr

<sup>7</sup> Die bis heute größten Prallluftschiffe wurden unter der Typenbezeichnung ZPG-3W Ende der 1950er-Jahre für die US-Marine gebaut (Fa. Goodyear). Sie wurden als Teil des amerikanischen Frühwarnsystems entwickelt. (Traggasvolumen ca. 40 000 m<sup>3</sup>, Länge ca. 123 m). ([www.lexikon-definition.de/ZPG-3W.html](http://www.lexikon-definition.de/ZPG-3W.html))

<sup>8</sup> Kriechen bezeichnet eine Materialeigenschaft, eine zeitabhängige Verformung des Materials unter einer andauernden konstanten Spannung bzw. Belastung.

<sup>9</sup> PBO steht für Polybenzoxazolfasern (chemisch: Poly(phenylene-2,6-benzobisoxazole)).

<sup>10</sup> LCP (Liquid Cristal Polymer) ist ein geschmolzenes Flüssigkristallpolymer, aus dem ein thermoplastisches mehrfaseriges Garn gesponnen wird (Handelsname: Vectran). Es wird als Verstärkungs- und Matrixfaser eingesetzt (z. B. in Segeltüchern).

genaue Fertigung erforderlich, da Spannungsspitzen in der Membran nicht durch lokale Dehnung des Materials ausgeglichen werden können.

Ein entscheidender Aspekt ist die Weiterreißfestigkeit<sup>11</sup>, da hochfeste aber auch hochsteife Membranen bereits bei sehr kurzen Anrissen schlagartig versagen können. Sie haben demnach eine hohe Zugfestigkeit aber eine geringe Weiterreißfestigkeit. Hier besteht noch erheblicher Forschungs- und Entwicklungsbedarf. Hauptanwendungsgebiet für diese Extremmaterialien wären Stratosphären-Plattformen.

Der Einsatz neuer Fasern für Luftschiffe erfolgte bisher nur auf experimenteller Ebene. Beispielsweise ist ein Schwerlastballon (CL75) bereits aus LCP-Fasern (Vectran) gebaut worden und hat die prinzipielle Eignung des Materials gezeigt. Jedoch ist Vectran bisher nicht in den für Lastluftschiffe notwendigen Tuchgewichten industriell hergestellt worden (u. a. betriebswirtschaftliche Gründe). Hier besteht noch Entwicklungsbedarf.

Abbildung 9 zeigt grob den Stand der Entwicklung bei den Hüllmaterialien für Stratosphären-Plattformen. Während für Transportluftschiffe relativ schwere Hüllen

zum Einsatz kommen (ca. 800 g/m<sup>2</sup>) werden für Stratosphären-Plattformen vergleichsweise leichte Hüllen (100 bis 200 g/m<sup>2</sup>) benötigt (Kröplin 2003, S. 23). Dies erfordert entsprechend hochwertige Materialien (Gewebe, Folien, Verklebungen). Entwicklungsbedarf besteht hier bei der Qualitätssicherung sowie bei neuen Materialkombinationen.

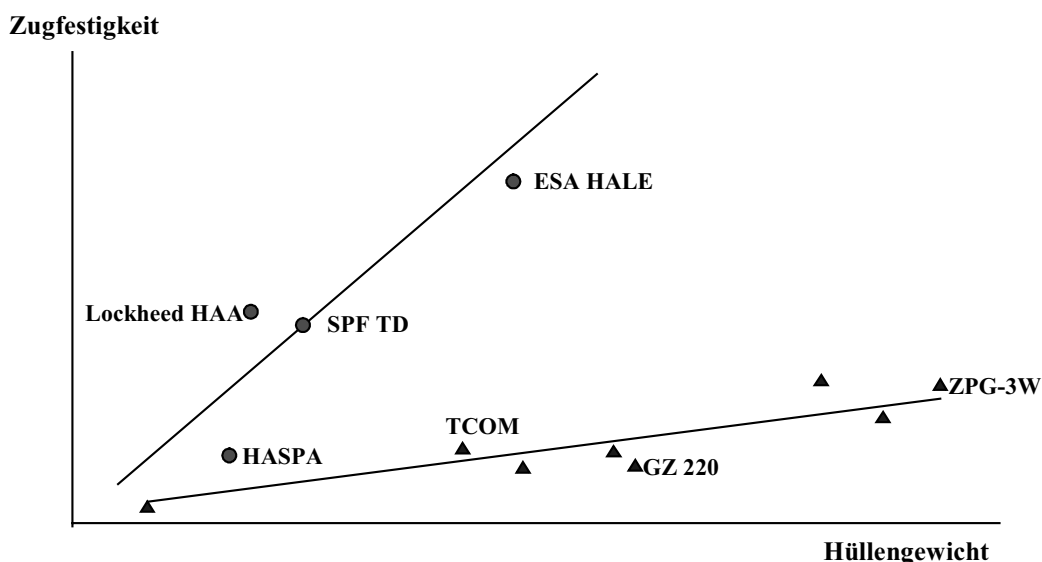
Neben leichteren und festeren Materialien werden auch neue, unkonventionelle Konfigurationen mit verfügbaren Materialien entwickelt (z. B. Luftwurm-Konzept siehe Kap. 2.1.3.). Hier wird durch die Bauweise die Struktur verändert, so dass Materialanforderungen sich verändern. Vorzüge dieser Konstruktion liegen beispielsweise in der Möglichkeit, vorhandene, preiswerte Materialien (z. B. PE) zu verwenden, die gut recycelt werden können, sowie in der Möglichkeit, besonders schlanke Luftschiffkörper zu bauen, welche nur relativ niedrige Luftschiffhallen benötigen (Kröplin 2003, S. 18).

Das Hüllmaterial unterliegt Alterungsprozessen. Die Alterung von Kunststoffen kann sich z. B. durch eine Absenkung der mechanischen Festigkeit bemerkbar machen. Zudem können Mikrorisse entstehen, die zu einer Erhöhung der Gasdurchlässigkeit führen können. Eine alterungsbedingte Zerstörung der Hüllmaterialien kann zu einem Versagen der Hülle führen, insbesondere bei kombinierten Belastungen (z. B. hohe UV-Strahlung mit hoher Temperatur) (Bock/Knauer 2003).

<sup>11</sup> Bei der Weiterreißfestigkeit wird die Kraft gemessen, die aufgewendet werden muss, um eine Probe mit Anriss weiter aufzureißen (Kröplin 2003, S. 15).

Abbildung 9

### Zugfestigkeit des Hüllmaterials in Relation zum Hüllengewicht für niedrig fliegende Luftschiffe und Stratosphären-Plattformen



Legende: Dreiecke: bisherige, realisierte bodennahe Luftschiffprojekte, für die auf Polyestergerewebe basierende Hüllen eingesetzt wurden. TCOM (Fesselballon von TCOM), GZ 22 (Prallluftschiff von Goodyear), WDL1 (Prallluftschiff von Westdeutsche Luftwerbung) ZPG-3W (Navy Blimp). Punkte: Sollen Luftschiffe der Prallbauweise in der Stratosphäre eingesetzt werden, dann sind deutlich leichtere und festere Hüllen notwendig. Diese Hüllen sind bisher nicht gebaut, sondern lediglich projektiert oder als Laborproben hergestellt worden. Vertreter: HASPA (High Altitude Super Pressure Airship), Lockheed HAA (High Altitude Airship), SPFTD (Stratospheric Platform Technology Demonstrator), ESA HALE (European Space Agency High Altitude Long Endurance).

Quelle: Eguchi et al. 2002, Kröplin 2003, S. 17

Für die Lebensdauer der Hüllen ist insbesondere ihre Beständigkeit gegenüber UV-Strahlung entscheidend. Als Witterungs- und UV-Schutz stehen erprobte Folien und Anstriche zur Verfügung. Zum Umgang mit der Hüllenalterung gibt es mehrere Konzepte bzw. Praxiswerte: Aufbringen eines Schutzanstriches (jährlich erneuern; Lebensdauer 15 bis 20 Jahre), Verwendung einer preiswerten Wegwerfhülle (Lebensdauer der Hülle fünf Jahre) oder Einsatz einer Beschichtung mit Materiallaminat mit Schutzfolie (Lebensdauer 10 bis 12 Jahre) (Kröplin 2003, S. 18). Zum Materialeinsatz in Stratosphären-Plattformen gibt es keine Erfahrungswerte<sup>12</sup>.

### Rissverhalten der Hülle

Auftretende Risse in der Hülle können zu einem Traggasverlust führen. Beschädigungen bzw. Risse können z. B. durch Kugellöcher (Beschuss), Messerstiche (mutwillige Beschädigung), Blitzschlag, Überlastung oder Alterung des Materials, Propellerbruch, Kollision oder Abreißen von Anbauteilen an der Hülle hervorgerufen werden. Fortschreitende Risse stellen ein hohes Risikopotenzial dar. Steht die Hülle – auf Grund von Innendruck (wie bei Prallluftschiffen) und sonstiger Lasten – unter Spannung, ist die Neigung zur Rissvergrößerung höher. Kleine Beschädigungen sind im Regelfall duldbar was durch ein einfaches Testverfahren<sup>13</sup> nachweisbar ist (Zeppelin 2003, S. 20).

Die heute verwendeten synthetischen Mehrschichtlamine werden oft zusätzlich mit thermoplastischen Laminaten kaschiert und zeichnen sich damit durch eine hohe Rissfestigkeit aus. Spezielle Rissstoppkonstruktionen sollen zudem vermeiden, dass ein Riss nicht weiter als durch den Stopper begrenzt reißt. Zu diesem Zweck werden z. B. in definierten Abständen stärkere Fäden eingelegt. Auch Stossstellen und Überlappungen können Rissstoppfunktionen übernehmen. Absolut wirksame Rissstopptechnologien ohne Überschreitung vertretbarer Flächengewichtsspezifikationen sind heute nicht verfügbar. FuE-Bedarf besteht bei aussagefähigeren Tests bezüglich der Rissausbildung bei größeren Schäden unter definierten Innendruckparametern. Beispielsweise sind bedruckte Prüfzylinder aus Hüllenmaterial bei einigen Herstellern in Erprobung. Eine Standardisierung solcher Tests zur Aufnahme in Bauvorschriften wäre anzustreben.

### 2.3.2 Struktur

Strukturen kommen bei der starren und halbstarren Bauweise zum Tragen. Dabei ist eine Vielzahl von Bauprinzipien bekannt. Bei halbstarren Luftschiffen wird ein Teil

der Lasten durch die Hülle getragen, der Großteil aber durch ein starres Gerüst. Einmal wird dadurch erreicht, dass bei signifikanter Beschädigung der Hülle das Luftschiff nicht kollabiert und steuerbar bleibt. Ebenso wird das Einleiten hoher Belastungen in die Hülle vermieden und Antriebe, Leitwerke und Gondel können flugmechanisch optimal positioniert werden. Andererseits entstehen durch Interaktion von starrer Struktur und Hülle (respektive Ballonets) komplexe strukturmechanische Problemstellungen, welche insbesondere für sehr große Luftschiffe noch intensiver Forschung und Entwicklung bedürfen.

Zur Anwendung kommen grundsätzlich alle in der Luft- und Raumfahrt bewährten Werkstoffe wie Aluminium oder Faserverbundwerkstoffe. Letztere bieten oft Vorteile bei großflächigen oder langen, filigranen Bauteilen mit großer Schadenstoleranz. Insbesondere für große Luftschiffe (ab ca. 20 Passagiere) besteht Forschungsbedarf hinsichtlich optimaler und kostenminimierter Strukturkonzepte. Auf Grund der geringen Stückzahlen von Luftschiffen werden Kunststoffbauteile meist in Nasslaminattechnik hergestellt (Zeppelin 2003). Um Massevorteile durch höhere Festigkeit auszuschöpfen, wäre die bei großen Flugzeugen angewandte Fertigungstechnologie wünschenswert (Prepregtechnik, Autoklavtechnik). Zum Einsatz für große Luftschiffbauteile ist hier eine Weiterentwicklung notwendig. Mit einer ausgereifteren Fertigungstechnologie könnten auch Kostenvorteile ausgeschöpft werden.

Die weitere Entwicklung von Strukturelementen für Luftschiffe wird durch Bauvorschriften (Stabilitätsnachweise etc.) mitbestimmt. Da starre und halbstarre Luftschiffe sensitiver auf Überlastung als Blimps reagieren, ist eine Validierung der Lastannahmen durch Fluglastmessungen erforderlich. Besonders für sehr große und im Interkontinentalverkehr einzusetzende Luftschiffe sind atmosphärische Lasten (Böen, Aufwinde, Allwetter) nicht hinreichend bekannt. Zum Nachweis, dass die Struktur den auftretenden Belastungen standhält, kann der im Flugzeugbau übliche Weg (Bau einer Bruchzelle<sup>14</sup>) auf Grund der Größe einer Luftschiffstruktur nicht beschränkt werden. Daher sind hier neue Ansätze zur Nachweisführung speziell für große Luftschiffe erforderlich.

### 2.3.3 Traggasmanagement

Im Routinebetrieb eines Luftschiffs entstehen Heliumverluste durch Diffusion durch das Hüllenmaterial, an konstruktiv bedingten Durchbrüchen (z. B. für Seile, Kabel und Geräteeinbauten) trotz entsprechender Abdichtungsmaßnahmen sowie durch kleinere Beschädigungen. Ein anliegender Hüllen-Innendruck verstärkt diesen Effekt erheblich. Verlust und Verunreinigung des Heliums führen zu Auftriebsverlusten, so dass diese in regelmäßigen Abständen ausgeglichen werden müssen.

<sup>12</sup> Jedoch sind für Überdruckstratosphärenballone aus Polyesterfolie (Flughöhe 20 km) Einsatzzeiten von über einem Jahr dokumentiert (Kröplin 2003).

<sup>13</sup> Heute ist in Bauvorschriften ein einfaches Testverfahren für kleine Schäden definiert: Eine Zugprobe wird mit einem 1“ (25mm) breiten Schnitt versehen und mit der höchsten auftretenden Belastung geprüft. Schadenstolerantes Verhalten liegt vor, wenn eine Lastumlagerung um die Schnittstelle herum erfolgt, die max. Last trotz Einschnitt gehalten wird und der Einschnitt nicht weiterreißt (Zeppelin 2004).

<sup>14</sup> Eine Bruchzelle ist ein Flugkörper, der nicht fliegen kann, an dem jedoch statische Tests (z. B. Biegebelastungen) am Boden vorgenommen werden können, bis das Material nachgibt (bricht).

### Traggasverluste

Die Durchlässigkeit der Hülle ist abhängig von den verwendeten Materialien, sowie von Dicke und Aufbau des Laminates. Durch Beanspruchung bei Herstellung, Betrieb und Wartung (z. B. durch Falten und Begehen der Hülle) entstehen sog. Nadellöcher. Diese, wie auch während des Betriebes entstehende Risse (s. a. Hülle), führen ebenso wie Befüllungs- und Entleerungsvorgänge zu weiteren Heliumverlusten (Zeppelin 2003, S. 25).

Undichtigkeiten der Hülle werden in regelmäßigen Inspektionen aufgespürt und repariert (z. B. durch visuelle Techniken, Beobachtung von Blasenbildung nach Aufbringen von Seifenlauge auf der Hülle, optisches Durchleuchten mit Strahlern, thermographische Verfahren mittels Wärmebildkamera, Diagnose durch Heliummessgeräten). Solche Inspektionen sind insbesondere bei sehr großen Luftschiffen zeitintensiv, da die gesamte Hülle von außen (ggf. auch von innen) inspiziert wird.

Um größere Reparaturen oder Inspektionen durchzuführen, ist es im Regelfall erforderlich, die Hülle vom Traggas zu entleeren. Selbst bei sorgfältiger Planung und Durchführung entstehen dabei Heliumverluste in der Größenordnung von 5 bis 10 Prozent des Luftschiffvolumens (Zeppelin 2003, S. 25). Das Nachfüllen von Traggas erfolgt durch stationär vorhandene Heliumtanks am Standort des Betreibers, aber auch über mobil disponierte Heliumgebände (Einzelflaschen oder Tankzug). Die Entwicklung von effektiven und kostengünstigen Hülleninspektionsverfahren ist insbesondere für größere Luftschiffe dringend notwendig.

### Verunreinigungen

Aus wirtschaftlichen Gründen sollten Verunreinigungen des Heliums in engen Grenzen gehalten werden. Der Grenzwert liegt üblicherweise bei einer Heliumreinheit von mehr als 95 Prozent (Zeppelin 2003, S. 26), wobei hohe Reinheitsgrade über 99 Prozent zunehmend unwirtschaftlich werden. Bei einem Abfall der Reinheit auf 90 bis 94 Prozent wird eine Helium-Reinigung vorgenommen.

Verunreinigungen entstehen u. a. durch eine Diffusion von Luft und Wasserdampf durch die Hülle und die Ballonets oder durch Leckstellen in der Heliumzelle. Zudem kann es bereits beim erstmaligen Befüllen von starren oder halbstarren Luftschiffen mit dem Traggas zu einer Verunreinigung durch Vermischung von Helium und Luft kommen. Beim Blimp sind solche Verunreinigungen konstruktionsbedingt geringer. In jeden Fall ist in bestimmten Zeitabständen eine Reinigung des Heliums (zum Teil bereits beim Befüllen) notwendig. Die Aufreinigung des Heliums erfolgt in einer separaten Anlage. Je nach Betrieb und Zustand eines Luftschiffes ist dies alle 2 bis 12 Wochen erforderlich.

Heutige Reinigungsanlagen arbeiten nach einem Filterprinzip: Verunreinigtes Helium wird an einer oder mehreren Stellen aus dem Luftschiff entnommen und einer Reinigungsanlage zugeführt. Luftmoleküle, wie Sauerstoff, Kohlendioxid und Stickstoff, werden ausgefiltert und aus-

geschieden. Das hoch gereinigte Helium wird dem Luftschiff wieder zugeführt. Der Kreisprozess wird so lange weitergeführt, bis die gewünschte Reinheit erreicht ist.

Heliumreinheit und -verlust müssen zum sicheren Betrieb von Luftschiffen ständig (ggf. mehrmals täglich) überwacht werden. Aus den gemessenen Zustandswerten (Heliumtemperatur, -volumen, -reinheit, -feuchte etc.) wird der jeweils aktuelle Auftrieb z. B. mit Rechenprogrammen ermittelt. Zur Überwachung im Luftschiff sind Bordsysteme und/oder externe Messsysteme nötig, für deren Konzeption und Optimierung noch FuE-Bedarf besteht.

### Alternative Traggase

Die bestehenden Bauvorschriften für zivile Luftschiffe fordern die Verwendung von nicht brennbaren Traggasen. Daher wird zurzeit als Traggas (neben Heißluft und experimentell auch Wasserdampf) nur das inerte Helium eingesetzt. Helium ist aber vergleichsweise teuer und hat die Eigenschaft, durch nahezu alle Materialien hindurch zu diffundieren. Vor allem die im Luftschiffbau üblichen dünnen Folien weisen eine Durchlassrate auf, die bei Langzeiteinsätzen ohne Ersatz von Traggas nicht tolerierbar ist (Zeppelin 2003). Neben der Verbesserung der Hüllenmaterialien besteht technisch die Möglichkeit, entweder Wasserstoff als Traggas einzusetzen (durch entsprechende Inertgas-Zusätze nicht brennbar gemacht) oder das durch die Hülle verloren gegangene Helium durch Beimischung von Wasserstoff zu ersetzen. Die Verwendung von Wasserstoff ist interessant, da dieser deutlich preiswerter ist und etwa bei der Verwendung von Brennstoffzellen als Energiespeicher (bei hochfliegenden Luftschiffen durch Elektrolyse erzeugt werden würde) ohnehin zur Verfügung stünde. Bei einem Einsatz von Wasserstoff ist neben der technischen Eignung eine mögliche Gefährdung zu prüfen.

### 2.3.4 Antriebssysteme

Als konventionelle Antriebe kommen in Luftschiffen Benzinmotoren, Dieselmotoren sowie Turbinen in Frage. Alternative Antriebskonzepte basieren zumeist auf elektrischen Antrieben verbunden mit der Nutzung regenerativer Energiequellen (Solarenergie) und/oder Wasserstoff.

### Konventionelle Antriebe

Die Antriebe von heute operierenden Luftschiffen sind entweder Kolbenmotoren, die für Kleinflugzeuge konstruiert wurden, oder aber aus dem Pkw-Sektor entstammende Motoren, die für eine Luftfahrtzulassung modifiziert wurden. Die Technologie dieser Motoren entspricht meist dem Stand der 50er-Jahre des letzten Jahrhunderts (Zeppelin 2003, S. 50), seitdem werden in der Luftfahrtindustrie fast nur noch Strahltriebwerke eingesetzt.

In luftfahrtzugelassenen Benzinmotoren, wie sie z. B. im Zeppelin NT verwendet werden, wird als Kraftstoff zumeist noch bleihaltiges Flugbenzin<sup>15</sup> (AVGAS) eingesetzt. Benzinmotoren mit höherer Leistung, wie sie für neuere Luftschiffprojekte erforderlich wären, sind gegenwärtig nicht verfügbar. Daher denkt man hier vor allem

an Dieselmotoren bzw. Turbinen. Beide besitzen gegenüber Benzinmotoren technologische Vorteile:

Mit Dieselmotoren könnte – trotz des höheren Baugewichts – durch den geringeren Treibstoffverbrauch 15 Prozent Brennstoffgewicht eingespart werden und somit die Frachtkapazität und Reichweite von Luftschiffen erhöht werden (Kröplin 2003). Auch die Brandgefahr wäre beim Einsatz von Diesel geringer (höherer Flammpunkt<sup>16</sup>). Heutige Dieselmotoren aus dem PKW- oder Nutzfahrzeugsektor lassen sich mit akzeptablem Aufwand für den Einsatz in Luftschiffen modifizieren. Im Wesentlichen handelt es sich bei den erforderlichen Modifikationen um Gewichtseinsparmaßnahmen und eine Luftfahrtqualifikation der Systeme. Vereinzelt werden bereits Luftschiffprojekte mit Dieselmotoren projektiert. (Kröplin 2003, S. 21). Mittelgroße und große Dieselantriebe (300 bis 1 000 PS) für die Luftfahrt existieren allerdings derzeit nicht bzw. nur im Projektstadium (Zeppelin 2003, S. 50).

Daher werden derzeit für die meisten Großluftschiffprojekte Turbinen als Antriebe projektiert<sup>17</sup>. Diese sind in der Luftfahrt verbreitet und sind bezogen auf die Leistung wesentlich leichter als Kolbenmotoren. Der Kraftstoffverbrauch ist bei mittlerer bis geringer Auslastung (z. B. bei langsamen Überwachungsflügen) deutlich höher, bei hoher Auslastung jedoch gleich oder niedriger als beim Benzinmotor. Als Treibstoff wird Kerosin eingesetzt.

Durch die Flugeigenschaften des Luftschiffes werden die Antriebsaggregate im Vergleich zum Flugzeug über einen viel größeren Leistungsbereich betrieben. Insbesondere der Betrieb im Langsamflug mit einer geringen Bedarfsleistung kann dazu führen, dass die Motoren – da nicht mehr im Idealbereich – mit einem erhöhten spezifischen Kraftstoffverbrauch betrieben werden müssen. Zudem ist bei hohem Leistungsbedarf und geringer Fluggeschwindigkeit die Luftkühlung ungenügend. Dies führt unter Umständen zu verringerten Lebensdauern der Motoren (Zeppelin 2003).

Ein erheblicher Forschungsbedarf bei konventionellen Antrieben besteht auf der Antriebsseite nach dem Motor (Antriebstrang aus Getrieben und Fernwellen) und in der Triebwerksregelung (zum Beispiel für Constant-Speed-Regelung für Manövertriebwerke).

Ein Entwicklungspotenzial könnte auch der Einsatz anderer Treibstoffe als Benzin, Diesel oder Kerosin eröffnen. Bereits im Starrluftschiff „Graf Zeppelin“ (LZ127) wurden Erdgas und Wasserstoff („Blaugas“<sup>18</sup>) erfolgreich eingesetzt. Der Vorteil besteht darin, dass diese Gasmischungen eine ähnliche Dichte wie Luft ha-

ben, so dass bei ihrer Verbrennung auf Langstreckenflügen keine Gewichtsausgleichs-Maßnahmen notwendig sind. Nur so waren Fahrten von über 10 000 km möglich (Kröplin 2003, S. 23). Diese Konzepte wurden zunächst (u. a. wegen zunehmender Anforderungen an den Brandschutz) nicht weiterentwickelt. Ihr Einsatz wird jedoch in Einzelprojekten derzeit wieder angestrebt, u. a. weil mit einer Wasserstoffverbrennung prinzipiell ein Null-Emissions-Antriebskonzept erfolgen könnte (z. B. DELCON 2004).

Sollten konventionelle Antriebe in Stratosphären-Luftschiffen eingesetzt werden, entsteht ein erheblicher Entwicklungs- und Anpassungsbedarf: Unter stratosphärischen Bedingungen besteht die Gefahr, dass Kraft- und Schmierstoffe zähflüssig werden (Ausscheiden von Bestandteilen, Dampfblasenbildung in Zuleitungen), so dass Zusätze entwickelt werden müssten, die dieses verhindern. Zudem befindet sich auf Grund der geringen Luftdichte pro Kolbenhub ein Bruchteil des sonstigen Brenngemisches im Zylinder, d.h. der Motor arbeitet weniger effektiv. Anpassungsmaßnahmen wären z. B. Überverdichtung oder der Einbau von Aufladegebläsen (Zeppelin 2003).

#### Alternative Antriebe

Als Alternative zu den konventionellen Antrieben bieten sich vor allem elektrische Antriebe und/oder der Einsatz von Wasserstoff an. Gegenwärtig wird dieses Antriebskonzept vor allem für Stratosphären-Luftschiffe diskutiert, da ein konzipierter Dauereinsatz über mehrere Monate hinweg bei Tag und Nacht ohne die Nutzung von Solarenergie kaum vorstellbar erscheint.

Das Antriebssystem – bestehend aus Propeller und Elektromotor – ist prinzipiell verfügbar, wobei Erfahrungen beim Einsatz bei tiefen Temperaturen noch fehlen (Zeppelin 2003). Die Energieversorgung in großer Höhe sollte für lange Missionen ausgelegt sein, d. h. eine hohe Zuverlässigkeit bei gleichzeitig hohen Standzeiten aufweisen. Zudem wären sowohl das Antriebssystem als auch alle Bord- und Nutzlastsysteme zu versorgen. Zwei Möglichkeiten bieten sich dabei an: Photovoltaik entweder mit Batterien als Speichermedium oder mit einem Brennstoffzellensystem.

Die Anforderungen an Photovoltaiksysteme sind unter den dort vorherrschenden Umwelteinflüssen relativ hoch (hohe Leistungsdichte, Widerstandsfähigkeit und Zuverlässigkeit etc.). Für den Einsatz in Luftschiffen sind sehr leichte und flexible Solarzellen erforderlich, die sich auf der elastischen Hülle befestigen lassen. Geeignete Solarzellen, z. B. kristalline Silizium-Module in Folienbauweise oder amorphes Silizium, sind prinzipiell verfügbar, erreichen aber noch nicht die erforderlichen Wirkungsgrade. Teilweise noch im Forschungsstadium befinden

<sup>15</sup> Flugbenzin (AVGAS – AViation GASoline). Dabei handelt es sich um leicht verbleites (LL = Low Lead) Benzin mit einer hohen Oktanzahl (von 100).

<sup>16</sup> Der Flammpunkt ist ein Maß für die Feuergefährlichkeit eines Stoffes; er bezeichnet die Temperatur, bei der der Dampfdruck so hoch ist, dass sich das entstehende Gas/Luft-Gemisch mit einer Zündquelle entzünden lässt (Benzin -20 °C, Diesel 55 °C, Kerosin 50 °C, Motoröl 80 °C).

<sup>17</sup> So z. B. für den CargoLifter CL160 (Kröplin 2003).

<sup>18</sup> Blaugas wurde je nach Lieferant in verschiedenen Mischungen verwendet. Beispielsweise schwere (Propylen, Butylen, Aethan) und leichte (Azethylen, Methan, Wasserstoff) Gase oder 66 Prozent Propan, 34 Prozent Wasserstoff (US-Mischung) (Kröplin 2003).

sich zurzeit Solarzellen auf der Basis von CIS/CIGS (Kupfer-Indium-(Gallium)-(Sulfo)-Selenid) oder CdTe (Cadmiumtellurid).

Als Energiespeicher und -puffer kommen für elektrische Antriebe zum einen moderne Batteriekonzepte wie Lithium-Ionen-Akkus mit hoher Leistungsdichte in Betracht oder aber eine Kombination von Elektrolyseur, Wasserstoffspeicher und Brennstoffzelle bzw. eine regenerative Brennstoffzelle. Zwar sind die zentralen Technologien (zumindest labormäßig) verfügbar, jedoch fehlt es an einer Erprobung der Komponenten bzw. des Gesamtsystemes im realen Umfeld des Flugbetriebes (niedrige Temperatur und Umgebungsdruck<sup>19</sup>) vor allem im Zusammenspiel mit den anderen Systemen eines Luftfahrzeuges. Daher ist hier eine luftschiffspezifische Anpassung notwendig.

Als Elektromotoren kommen überwiegend Gleichstrommotoren in Betracht. Diese Motoren haben hohe Wirkungsgrade und lassen sich für nahezu jeden Leistungsbedarf auslegen. Da ihr Gewicht nahezu proportional zum Drehmoment (also nicht zur Leistung) ist, ist es erforderlich, für elektrische Antriebe spezielle leichte Getriebe mit hohen Wirkungsgraden zu entwickeln. Die elektronische Steuerung dieser Motoren ist darüber hinaus noch für den Luftfahrteinsatz auszulegen (Blitzschlag etc.).

Langfristig könnten solche Antriebe auch für niedrig fliegende Luftschiffe eine Alternative zum Antrieb mit fossilen Brennstoffen darstellen. Hier erhofft man sich Synergieeffekte aus den Bereichen Straßenverkehr und Schifffahrt (Brennstoffzellen in Fahrzeugen, Solarfähren).

### 2.3.5 Blitzschutz

Die Gefährdungseinstufung eines Luftschiffs hängt im Wesentlichen von der Größe der Hülle, dem Material und dem Vorhandensein einer metallischen Struktur ab.

Auf Grund der geringen Fluggeschwindigkeit ist davon auszugehen, dass ein Blitz ortsfest auf der Oberfläche bleibt, so dass über die Berührungsstelle unter Umständen die gesamte Energie übertragen<sup>20</sup> wird. Dabei können Verbrennungen von organischen Materialien, Absplitterung und Formveränderungen der Oberfläche, Druckschäden durch eine Sprengwirkung bei Verdampfung von feuchtem Material entstehen (Zeppelin 2003, S. 34).

Ein direkter Blitzeinschlag in die Hülle bewirkt lediglich ein relativ begrenztes Loch. Maßgeblich ist der weitere Verlauf des Blitzpfads (auch als mögliches Trennschweissen der Hülle bezeichnet) und die Selbstverlöschung der Einschlagstelle. Ein Hüllenschaden selbst führt zum ei-

nen zu möglicherweise massivem Traggasverlust, zum anderen beim Prallluftschiff zusätzlich zur strukturellen Schwächung (Zeppelin 2003). Weitergehende Grundlagenuntersuchungen zu diesem Thema sind wichtig.

Ein Blitz kann die Hülle durchschlagen und einen Blitzkanal im Helium ausbilden. Metallische Struktur und Ionisationseffekte beeinflussen den Verlauf des Blitzpfads. Je engmaschiger die metallische Struktur im Luftschiff ist, desto besser wirkt sie als Faraday'scher Käfig, bildet einen direkten Blitzpfad und trägt somit zur Begrenzung des maximal möglichen Hüllenschadens bei. Durch den Verlauf des Blitzpfads durch das Luftschiff können weitere Gefährdungen, z. B. für die innere Struktur, Systeme oder Kraftstofftanks entstehen.

Für den direkten Blitzschutz werden traditionell z. B. Metall- und Faserverbundbauweisen mit entsprechenden Schutzmaßnahmen wie metallische Blitzpfadstreifen, Einlegen von Aluminium- oder Kupfergewebe oder Leitlacken, eingesetzt. Allerdings sind zur Beherrschung von indirekten Effekten die traditionellen Standards zum Schutz von elektrischen Leitungen und Geräten nicht ausreichend. Spezielle Blitzschutz-Konzepte werden derzeit (z. B. an der TU Cottbus) entwickelt. Hier besteht noch weiterer Forschungsbedarf. Synergieeffekte gibt es hier möglicherweise bei der Entwicklung von innovativen Blitzschutzfolien (z. B. für Windturbinen und textile Bauten) (Gebhardt 2004).

### 2.3.6 Forschungs- und Entwicklungsbedarf

Aerostaten haben einen technischen Stand erreicht, der sie zu relativ sicheren und einfachen, in der Bodeninfrastruktur jedoch aufwendigen Plattformen macht. Luftschiffe kleiner und mittlerer Größe für niedrige Flughöhen konnten in den letzten Jahrzehnten vor allem durch Verbesserungen in den Baumaterialien und Fortschritte der elektronischen Flugsteuerungen profitieren, die sie deutlich wirtschaftlicher und alltagstauglicher im Betrieb machen. Im noch eher experimentellen Feld der Großluftschiffe, Hybrid-Luftschiffe und der Stratosphären-Luftschiffe existieren viele Projekte und Ideen, die bis jetzt jedoch noch nicht zu praktisch einsetzbaren Luftfahrzeugen geführt haben (Zeppelin 2003, S. 18).

Insgesamt bleibt festzuhalten, dass verfügbares LaL-Wissen auf etwa 40 bis 60 Jahre alten Archiven basiert und heutige Luftschiffprojekte damit auf einer vergleichsweise dünnen Daten- und Wissensbasis aufbauen. Damit sind heutige Luftschiffprojekte von einem Optimierungsstadium – wie es in der allgemeinen Luftfahrt erreicht ist – noch relativ weit entfernt (Mandel 2003, S. 27).

Im Folgenden wird der Forschungs- und Entwicklungsbedarf auf den verschiedenen Gebieten umrissen.

#### Hüllenmaterialien

Bei den Hüllenmaterialien besteht ein Optimierungsproblem darin, dass hohe Festigkeit und geringe Gasdurchlässigkeit mit einem möglichst geringen Flächengewicht erreicht werden soll. FuE-Bedarf besteht in der optimierten

<sup>19</sup> In 20 km Höhe über dem Meeresspiegel beträgt der Luftdruck noch 5 Prozent bei einer Umgebungstemperatur von –60 °C.

<sup>20</sup> Im Gegensatz dazu kann bei schnellen Fluggeräten davon ausgegangen werden, dass der Blitzkanal über die Oberfläche hinwegfegt, ohne an Berührungspunkten hängen zu bleiben. Hier wird jeder Berührungspunkt nur mit einem Bruchteil der Gesamtenergie belastet (Zeppelin 2003).

Auslegung einzelner Materialschichten in Bezug auf die gewünschten Eigenschaftskombinationen (hohe Zug- und Weiterreißfestigkeit, hohe Gasdichtheit, gute Verarbeitbarkeit, Knickunempfindlichkeit etc.). Im Einzelnen geht es dabei um

- die Entwicklung von geeigneten Verbundwerkstoffen unter Berücksichtigung von fertigungstechnischen und betriebswirtschaftlichen Aspekten,
- die Entwicklung leichter, UV- und temperaturwechselbeständiger Hüllenwerkstoffe hoher Festigkeit sowie geeigneter Reparaturstrategien (z. B. bei auftretenden Rissen),
- die Bereitstellung von aussagefähigeren Tests bezüglich der Wahrscheinlichkeit der Rissausbreitung bei größeren Schäden (unter definierten Innendruckparametern) sowie die Standardisierung bzw. Normung von Risstests zur Aufnahme in Bauvorschriften,
- Materialentwicklungen für den speziellen Einsatz unter extremen Umgebungsbedingungen in Stratosphären-Plattformen und
- die Entwicklung spezieller, für Luftschiffe ausgelegter Blitzschutz-Konzepte.

### Struktur und Konstruktion

Durch die Interaktion von starrer Struktur und Hülle (respektive Ballonets) entstehen komplexe strukturmechanische Problemstellungen, welche insbesondere für sehr große Luftschiffe noch intensiver Forschung und Entwicklung bedürfen. Insbesondere für große Luftschiffe (ab ca. 20 Passagieren) besteht FuE-Bedarf hinsichtlich technisch optimierter Strukturkonzepte. Daneben ist eine Weiterentwicklung der Fertigungstechnologie für große Luftschiffbauteile notwendig. Erforderlich sind schließlich neue Ansätze zum Gesamtstrukturnachweis für atmosphärische Lasten (Böen, Aufwinde, Allwetter) bei großen Luftschiffstrukturen (Alternativen zur Bruchzelle).

### Steuerung

In diesem Bereich sind technologische Fortschritte z. B. bei Fly-by-wire-Flugsteuerungen für eine verbesserte aerodynamische Stabilität und Steuerbarkeit der Luftschiffe wünschenswert.

### Antriebstechnologien

Forschungsbedarf bei den verwendeten Antrieben besteht im Wesentlichen auf der Antriebsseite nach dem Motor (Antriebstrang aus Getrieben und Fernwellen) und in der Triebwerksregelung (zum Beispiel für Constant-Speed-Regelung für Manövertriebwerke). Der Forschungsbedarf bei Solarzellen (z. B. auf der Basis von CIS/CIGS oder CdTe) für ihre Anwendung, z. B. in Stratosphären-Plattformen ist noch relativ hoch.

Die als Energiespeicher und -puffer für elektrische Antriebe in Frage kommenden moderne Batteriekonzepte (Lithium-Ionen-Akkus) wie auch Kombinationen von

Elektrolyseur, Wasserstoffspeicher und Brennstoffzelle (regeneratives Prinzip) sind zwar (zumindest labormäßig) verfügbar, jedoch fehlt es an einer Erprobung der Komponenten bzw. des Gesamtsystemes im realen Flugbetrieb, vor allem im Zusammenspiel mit den anderen Systemen eines Luftfahrzeuges.

Zudem wird es erforderlich sein, für elektrische Antriebe spezielle leichte Getriebe mit hohen Wirkungsgraden zu entwickeln. Die elektronische Steuerung dieser Motoren ist noch für den Luftfahrteinsatz zu qualifizieren (z. B. Blitzschlag).

### Traggasmanagement

Die Entwicklung von effektiven und kostengünstigen Hülleninspektionsverfahren ist insbesondere für größere Luftschiffe dringend notwendig. Zur Überwachung der Heliumreinheit sind Bordsysteme im Luftschiff und/oder externe Messsysteme nötig. Solche Systeme müssten künftig konzipiert und optimiert werden. Bei einem Einsatz von Wasserstoff als Traggas ist neben der technischen Eignung eine mögliche Gefährdung zu prüfen.

### 3. Zulassung und Betrieb

Wie alle anderen Fluggeräte müssen auch LaL-Systeme den luftrechtlichen Anforderungen entsprechen, die das Ziel haben, Mindestsicherheitsstandards zum Schutz sowohl der Insassen des Luftfahrzeugs als auch der Menschen am Boden zu gewährleisten. Dazu regeln Bau- und Betriebsvorschriften die Anforderungen gemäß denen ein Luftfahrzeug entwickelt, zugelassen und betrieben werden darf. Zuständig hierfür ist seit September 2003 die European Aviation Safety Agency (EASA), die diese Aufgaben in Kooperation mit dem Luftfahrt-Bundesamt (LBA) und den anderen nationalen Luftfahrtbehörden wahrnimmt.

Problematisch für zukünftige LaL-Entwicklungsprojekte ist es, dass speziell auf LaL-Systeme zugeschnittene Vorschriften nur ansatzweise existieren. Darüber hinaus steckt die weltweite Harmonisierung der Vorschriften, die in der Luftfahrt für Verkehrsflugzeuge, Hubschrauber, Segelflugzeuge und andere Luftfahrtgeräte selbstverständlich ist, für Luftschiffe noch in den Kinderschuhen (Mandel 2003).

Die bestehenden Bau- und Betriebsvorschriften wurden bisher ausschließlich im Zusammenhang mit konkreten Entwicklungsprojekten – vor allem Zeppelin NT und CargoLifter – in enger Kooperation der Luftfahrtbehörden mit den Entwicklungsbetrieben erstellt. Wegen dieser beiden Projekte ist Deutschland auf diesem Gebiet im internationalen Vergleich gegenwärtig noch führend. Für den Zeppelin NT wurde die „Lufttüchtigkeitsforderung für Luftschiffe“ (LFLS) erarbeitet. Sie gilt für Luftschiffe bis zu einer Kapazität von 19 Passagieren. Für das Projekt CargoLifter wurden vom LBA die „Transport Airship Regulations“ (TAR) erstellt, die den erhöhten Anforderungen an ein großes Luftfahrtgerät Rechnung tragen sollten. Für in der Stratosphäre operierende Luftschiffe gibt es noch keine Bauvorschriften.

Welche Risiken für Luftschiffprojekte durch das Fehlen von Regularien entstehen, illustriert ein Beispiel aus der Entwicklung des Zeppelin NT (siehe Kasten).

**Risiken für LaL-Projekte durch fehlende Regularien am Beispiel des Zeppelin NT**

„(...) Dabei stellte sich die Frage nach der Gültigkeit und Anwendbarkeit der so genannten „Böenformel“. Diese Forderung dient dazu, die Belastungen unter Böeneinfluss auf ein Luftschiff zu beschreiben. Die Ingenieure können danach die Festigkeitsauslegung eines Luftschiffes berechnen, da diese Belastungen in der Regel die höchsten für ein Luftschiff sind. Das zu Stande kommen der zurzeit verwendeten empirischen Böenformel ist nicht mehr eindeutig nachvollziehbar. Dadurch wurden erhebliche Zweifel an der Gültigkeit und Anwendbarkeit gehegt, weshalb das LBA eine Untersuchung veranlasste. Dies geschah zu einer Zeit als diese Vorschrift bereits als Basis für die Zeppelin NT Zulassung veröffentlicht wurde. Glücklicherweise konnte die Gültigkeit dieser Formel später bestätigt werden, der Zeppelin NT war aber zu diesem Zeitpunkt längst konstruiert und fertig gestellt. Ein Fehler in dieser Vorschrift und eine nachträgliche Anpassung hätte katastrophale Auswirkungen für das Projekt haben können.“

(Mandel 2003)

Neben den Bau- und Betriebsvorschriften kommt den Verkehrsregeln im Luftraum eine für LaL-Projekte essentielle Bedeutung zu. Gegenwärtig operieren Luftschiffe vielfach unter Ausnahmegenehmigungen, die für jeden Einzelfall gesondert beantragt werden müssen. Werden die entsprechenden Genehmigungen (z. B. Überfluggenehmigungen sowie Start/Landeerlaubnisse und die Erlaubnis zur Unterschreitung der Mindestflughöhe über Städten von 500 m) nicht erteilt, kann ein geplanter Luftschiff-Einsatz nicht durchgeführt werden<sup>21</sup>.

Viele Betriebsszenarien von Luftschiffprojekten befinden sich nicht im Einklang mit den geltenden Regelungen. Beispielsweise können Flugzeuge bei schlechter Sicht allein nach Instrumenten fliegen, wenn sie durch die Flugsicherung vom Boden aus per Radar überwacht werden. Die Radarerfassung erfolgt technisch bedingt – außerhalb von Flughäfen – erst oberhalb von 1 500 m. Diese Höhe können z. B. voll beladene Cargo-Luftschiffe im Regelfall nicht erreichen. Sie müssten demzufolge nach Sichtflugregeln fliegen, d. h. bei schlechter Sicht am Boden bleiben. Ausreichend lange Betriebszeiten und eine möglichst hohe Verfügbarkeit sind auf diese Weise nur schwer erreichbar.

Für Stratosphären-Plattformen existieren bisher noch keinerlei zivile Verfahren und Methoden, wie ein autonomer und fern überwachter Betrieb geregelt werden kann.

Dringender Bedarf besteht aus den genannten Gründen vor allem in folgenden Feldern:

- Bau- und Betriebsvorschriften für alle Kategorien von Luftschiffen
- Vorschriften zur Zertifizierung von Herstellerbetrieben
- International gültige Pilotenlizenzen
- Regeln und internationale Vereinbarungen zu Überflugrechten und Start/ Landeerlaubnissen
- Regeln für Flüge im nicht überwachten Luftraum
- Regeln für unbemannten, autonomen Betrieb von Luftschiffen (Stratosphären-Plattformen)

Weitere Erfordernisse bestehen bei der LaL-spezifischen Anpassung von Inspektions- und Instandhaltungsroutinen sowie bei verbindlichen Lärmessvorschriften und Grenzwerten. So werden beispielsweise Lärmnachweise, die zur Musterzulassung eines Luftschiffes erbracht werden, unter Umständen bei der Verkehrszulassung oder beim Beantragen einer Überfluggenehmigung bei Behörden in Deutschland oder im Ausland nicht anerkannt.

Durch die Schaffung einer verlässlichen Basis bei Regeln und Standards, die auf die Erfordernisse der LaL-Technologie abgestimmt sind, könnten die bislang bestehenden Unsicherheiten, Risiken und Hemmnisse für die Entwicklung deutlich gesenkt werden.

### III. Einsatzfelder und Marktpotenziale

Ein etablierter Markt für Luftschiffe existiert heute in zwei Bereichen: in der Werbung und für touristische Rundflüge. In den übrigen hier beschriebenen Einsatzfeldern gibt es zwar nach übereinstimmender Einschätzung vieler Experten ein relevantes Potenzial für Luftschiffe, unterschiedliche Einschätzungen bestehen aber hinsichtlich der tatsächlichen Größe des Marktpotenzials und bezüglich der Frage, welcher Forschungs- und Entwicklungsaufwand zur Erschließung dieses Potenzials geleistet werden muss. Weitere Unsicherheiten bestehen bezüglich der Größe des Risikos, d. h. ob beziehungsweise wie schnell die erforderlichen technologischen Entwicklungsziele und die angestrebten Kostenziele erreicht werden können. Des Weiteren ist die Beantwortung der Frage, wie schnell ein einsatzfähiges Luftschiff den angestrebten Markt besetzen kann, auch von Annahmen zur Nutzerakzeptanz abhängig, die mit gewissen Unsicherheiten behaftet sind.

Die Unsicherheiten in all diesen Einschätzungen sind relativ hoch, da es sich zumeist um neue Märkte handelt, die erst erschlossen werden müssen. Praktische Erfahrungen und empirische Daten existieren daher hierzu meist nicht, vielmehr erfolgt eine Einschätzung auf der Grundlage von Plausibilitätsbetrachtungen und Analogieschlüssen bezüglich etablierter Märkte. Marktprognosen, die von verschiedenen Instituten – meist im Auftrag von Luftschiff-Unternehmen – durchgeführt wurden, haben zu divergenten Aussagen geführt (Zeppelin 2003). Allerdings sind realistische Einschätzungen in den genannten Bereichen für einen wirtschaftlichen Erfolg von Luftschiffprojekten in den angesprochenen Marktsegmenten von entscheidender Bedeutung.

<sup>21</sup> So musste der Überführungsflug des nach Japan verkauften Zeppelin NT in Helsinki abgebrochen werden, da die russischen Behörden die Überfluggenehmigung nicht rechtzeitig erteilten (ZLT 2004).



Alle zivilen Marktsegmente für tief fliegende Luftschiffe sind Nischenmärkte, die sich über die spezifischen Möglichkeiten und Vorteile von Luftschiffen gegenüber den etablierten Systemen definieren. Diese technologisch bedingten Vorteile – insbesondere die Fähigkeit (nahezu) senkrecht zu starten und zu landen, über einer Stelle zu schweben und ggf. Lasten auszutauschen, die Möglichkeit eines Punkt-zu-Punkt-Transportes – müssen für die konkreten Anwendungen gegen die möglichen Nachteile im Vergleich zu Konkurrenzsystemen abgewogen werden. Hier sind beispielsweise eine gewisse Wetterabhängigkeit von Luftschiffen oder ihre vergleichsweise niedrige Verlegegeschwindigkeit zu potenziellen Einsatzorten zu nennen.

Eine Besonderheit bei militärischen Anwendungen ist, dass der technologischen Leistungsfähigkeit eine sehr hohe Bedeutung beigemessen wird und in vielen Fällen Kostenerwägungen nicht die dominierende Rolle spielen.

Die Marktsegmente werden im Folgenden zunächst allgemein charakterisiert, danach werden die Besonderheiten des Luftschiffeinsatzes beleuchtet (Welche Anforderungen bestehen? Sind die Technologien verfügbar?). Der Status quo der Marktentwicklung wird umrissen und eine Einschätzung vorgenommen, wie weit entfernt man von der Umsetzung im entsprechenden Marktsegment ist. Dies berührt auch die Konkurrenzsituation mit anderen Verkehrsträgern und Systemen sowie bestehende Markthemmnisse.

Grundlage der folgenden Ausführungen sind hauptsächlich die Gutachten von Zeppelin Luftschifftechnik (Zeppelin 2003) von Prof. Kröplin (Kröplin 2003) sowie Gespräche mit Fachleuten.

## 1. Werbung

Ein etabliertes Einsatzfeld von Luftschiffen ist die Werbung. Der Markt wird überwiegend von relativ einfach aufgebauten Prallluftschiffen („Blimps“) bedient. Weltweit sind derzeit etwa 30 bis 40 Werbe-Luftschiffe im Einsatz. Die größte Flotte mit 16 Schiffen wird betrieben von der „Lightship Group“ (USA). In Deutschland sind drei Unternehmen auf diesem Feld aktiv. Dies sind die WDL Luftschiffgesellschaft mbH mit vier Luftschiffen im Einsatz, die GEFA-Flug GmbH, die Heißluftschiffe herstellt und betreibt, sowie die Deutsche Zeppelin Reederei DZR GmbH.

Der Werbemarkt insgesamt ist heiß umkämpft, und Luftschiffwerbung als nicht zielgruppenorientierte Werbung steht in Konkurrenz beispielsweise zu Bannerschlepp von Flugzeugen, Banden- oder Großbildwerbung. Der relativ hohe Mietpreis (ca. 8 000 bis 15 000 Euro pro Flugtag) begrenzt den Markt auf Großunternehmen mit hohem Marketingbudget. Alleinstellungsmerkmale sind u. a. die Größe der Werbefläche sowie die Exklusivität bzw. die generell positive Ausstrahlung von Luftschiffen.

Möglichkeiten der Weiterentwicklung liegen insbesondere in inkrementellen Verbesserungen bestehender Konzepte. Ein Entwicklungsziel wären z. B. preiswerte Kleinluftschiffe mit flexiblen schnell veränderbaren

Werbeaussagen. Aber auch Luftschiffe mit Leuchtausstattung oder mit besonderen Bauformen (z. B. eine „fliegende Bierflasche“) könnten für den Werbemarkt interessant sein.

Günstig für die Marktchancen von Luftschiffen in diesem Segment ist, dass Einsatzoptionen kombiniert werden können. So kann beispielsweise ein hauptsächlich für touristische Zwecke eingesetztes Luftschiff auch Werbung auf seiner Hülle tragen und auf diese Weise zusätzliche Einnahmen generieren. Auf der anderen Seite können Werbeluftschiffe auch für Missionen eingesetzt werden, die keine große Nutzlast erfordern, z. B. Überwachungsflüge.

## 2. Tourismus

Die wichtigsten Segmente des Luftschiff-Tourismus-Marktes sind Rundflüge zum Sightseeing und – vor allem aus historischen Gründen – mehrtägige Kreuzfahrten. Diese beiden Segmente werden ausführlicher behandelt, weil sie oft als Treiber für weitere Entwicklungen wahrgenommen werden. Dazu kommt noch der Städte-Tourismus, der Rundflug- und Kreuzfahrtelemente miteinander verknüpft.

Im Tourismus-Markt existiert noch eine Reihe von Untersegmenten, beispielsweise Zielfahrten (z. B. Verbindung zwischen Inseln, Pilgertransport), Event Fliegerei (z. B. kulturelle oder sportliche Ereignisse) und Corporate Charter (besonders wenn mit Werbung verknüpft), die möglicherweise eine gewisse Rolle spielen können, wenn hierfür geeignete Luftschiffe verfügbar sind. Allerdings ist eine gezielte Entwicklung auf diese Segmente hin zurzeit nicht abzusehen, es handelt sich eher um „Mitnahmemärkte“.

### Rundflüge/Sightseeing

Touristische Rundflüge werden in Deutschland angeboten durch die Zeppelin Luftschifftechnik GmbH. Die Luftschiffe vom Typ Zeppelin NT sind für 13 Passagiere ausgelegt. Flüge finden regelmäßig von Friedrichshafen aus über den Bodensee, aber auch zu anderen Destinationen statt. Potenzielle zukünftige Rundflugstandorte wären neben Großstädten (New York, Paris, Rom, Berlin etc.) auch landschaftlich reizvolle Gegenden und andere Sehenswürdigkeiten, z. B. Pyramiden, Grand Canyon, Iguacu, Tierreservate in Afrika. Weltweit gibt es ca. 30 bis 50 hoch frequentierte (mehr als 1 Mio. Besucher pro Jahr) potenzielle Einsatzorte für Luftschiffe.

Der Markt für Rundflüge/Sightseeing ist ein hart umkämpfter touristischer Nischenmarkt. Luftschiffe stehen hier in Konkurrenz zu den etablierten Systemen Flugzeug, Hubschrauber und Ballons. Diese haben gegenüber dem Luftschiffeinsatz eine Reihe von Nachteilen – Flugzeuge und Hubschrauber bieten nur eine begrenzte Sicht und sind oft auf Grund von Lärm und Vibrationen wenig komfortabel, Ballons sind sehr wetteranfällig. Auf der Kostenseite dagegen haben die Konkurrenzsysteme zu meist Vorteile gegenüber Luftschiffen, wie Tabelle 1 zeigt.

Tabelle 1

**Vergleich der Rundflug-Preise zwischen Luftschiff und Konkurrenzsystemen**

Fluggerät	Preis pro Passagier und Flugstunde in Euro ca.
Luftschiff (Zeppelin NT)	330
Hubschrauber	200–250 teilweise bis 500
Flugzeuge	100–150
Oldtimerflugzeuge	250–350
Ballon	150–250

Quelle: Zeppelin 2003, S. 84

Möglichkeiten zum Ausbau dieses Marktsegmentes bietet insbesondere die Entwicklung von größeren Luftschiffen mit einer höheren Passagierkapazität, um die Betriebskosten pro Passagier zu senken und damit die Wirtschaftlichkeit zu verbessern. So wäre beispielsweise eine Skalierung des gegenwärtig verfügbaren Zeppelins Typ LZ N07 von 13 auf 19 Plätze mit den vorhandenen Technologien ohne größeres Entwicklungsrisiko möglich. Die Kosten hierfür wären jedoch nicht unerheblich und werden auf etwa 70 bis 100 Mio. Euro geschätzt (Sträter 2003).

Noch größere Luftschiffe wären zwar betriebswirtschaftlich wünschenswert. Allerdings müssten hierfür die Zulassungsvorschriften erst geschaffen bzw. die bestehenden substanziell weiterentwickelt werden, da Regularien für Luftschiffe mit mehr als 19 Passagieren noch nicht existieren.

Zumindest saisonal ist an hoch frequentierten Standorten eine Auslastung für kleinere bis mittelgroße Luftschiffe (bis ca. 40 Passagiere) denkbar. Ein Markt für größere Einheiten (50 und mehr Sitzplätze) könnten Urlaubsrundflüge in Zentren des Massentourismus, z. B. die Mittelmeerinseln, darstellen. So wären 20- bis 30-minütige Rundflüge für etwa 50 Euro pro Person kostenmäßig eine Alternative zu sonstigen angebotenen Aktivitäten, wie z. B. Jet water skiing oder Gleitschirmfliegen.

**Kreuzfahrten**

Das touristische Marktsegment der Kreuzfahrten ist durch mehrtägige Reisen, mit hohem Komfort charakterisiert. Kreuzfahrten waren bis zum Ende der „Zeppelin-Ära“ Ende der 1930er-Jahre eines der wichtigsten Einsatzgebiete von Luftschiffen. Seither haben Firmen, wie „Rigid Airship Design“ (Holland), vergeblich versucht, Zeppeline alter Prägung und vergleichbarer Größenordnung zu bauen und im Kreuzfahrtbereich einzusetzen.

Luftschiffe müssten in diesem Segment vor allem mit den etablierten Kreuzfahrtschiffen konkurrieren. Oft wurden der wirtschaftliche Erfolg und die Zuwachsraten bei

Kreuzfahrten mit Kreuzfahrtschiffen als Beleg für die Attraktivität des Kreuzfahrtmarktes auch für Luftschiffe herangezogen.

Der wichtigste Konkurrenzvorteil von Luftschiffen in diesem Sektor ist ihre besondere Exklusivität und emotionale Anziehungskraft. Dem steht eine Reihe von Nachteilen gegenüber: Der Komfort von Luxus-Linern – z. B. geräumige Kabinen und Salons, Swimmingpool/Sauna, aufwändige und abwechslungsreiche Animations- und Entertainmentprogramme – ist in Luftschiffen kaum zu erreichen. Die Wetterabhängigkeit von Luftschiffen könnte – je nach Reisegebiet – zu mehr oder weniger häufigen Ausfällen oder Routenänderungen führen, die von den Passagieren akzeptiert werden müssten.

Des Weiteren wären die zu veranschlagenden Preise vermutlich prohibitiv hoch. Geht man davon aus, dass der weltweite Bedarf an Großluftschiffen für Kreuzfahrten in absehbarer Zeit auf 10 bis 30 begrenzt bleibt, führen Entwicklungs- und Ausrüstungsaufwendungen ähnlich der „Graf Zeppelin“ mit Salons, Schlafkabinen etc. zu Flugstundenkosten, die selbst im Luxusreisesegment nicht über die Preise gedeckt werden können. Hinzu kämen noch Kosten für eine Infrastruktur von in attraktiven touristischen Regionen gelegenen Luftschiffhäfen mit guter Verkehrsanbindung und hohem Komfort. Insgesamt bezweifeln Fachleute aus der Touristikbranche daher, dass Luftschiffe für mehrtägige Kreuzfahrten überhaupt geeignet sind (Zeppelin 2003).

**Städte-Tourismus**

Ein Konzept im Bereich Städte-Tourismus, das Rundflüge und Kreuzfahrten miteinander verbindet, wird derzeit unter dem Namen Zeppelin Europe Tours verfolgt. Dieser hat gegenüber dem reinen Kreuzfahrt-Konzept einige Vorzüge: Die Schiffe sollen Rundtouren über 10 Städte im Abstand von zwei Tagen fliegen, so dass die Bodeneinrichtungen in jeder Stadt täglich benutzt werden. Man kann potenziellen Kunden ein vielfältiges Angebot unterbreiten, das vom einstündigen Rundflug über den Transfer von einer Stadt zur anderen bis zur

20-tägigen Europa-Tour durch alle 10 Städte reicht. Damit kann ein sehr breiter Kundenkreis angesprochen werden. Die Kapazität der Schiffe soll 40 Sitze umfassen und wäre nach Expertenmeinung ohne größere Technologiesprünge realisierbar.

Ob eine kontinuierliche Nachfrage bestünde, die die Schiffe zu den kalkulierten Preisen (einstündiger Rundflug: 250 Euro, Streckenflug von Stadt zu Stadt: 1 250 Euro, 20-tägige Rundreise: 12 500 Euro pro Person) so auslastet, dass sie wirtschaftlich betrieben werden können, ist nicht mit Sicherheit zu beantworten. Die Gesamtkosten für die Entwicklung und den Bau der Luftschiffe und Bodeninfrastruktur werden mit 420 Mio. Euro angegeben (ftd 1. Mai 2004).

### 3. Missionsplattformen

Luftschiffe können mit unterschiedlichsten Sensoren und Auswertesystemen sowie Send- und Empfangsanlagen ausgestattet werden, um eine Vielzahl von Einsatzmöglichkeiten für privatwirtschaftliche, hoheitliche sowie militärische Anwendungen abzudecken.

Militärische Überwachungsaufgaben waren das wichtigste Einsatzfeld von Luftschiffen im und nach dem 2. Weltkrieg. Bis zur Beendigung ihres Luftschiffprogramms im Jahr 1962 betrieb die US Navy eine umfangreiche Flotte von Luftschiffen, die vor allem zur Langzeitüberwachung über dem Meer (zur Detektion von U-Booten und als Frühwarnsystem) eingesetzt wurden.

Einen Überblick über mögliche Aufgaben bietet Tabelle 2. Einen etablierten Markt für diese Anwendungen gibt es bislang nicht. Einzelne Einsätze als Sensorplattform für militärische und zivile Auftraggeber wurden

durchgeführt, vor allem um die Eignung für diese Einsätze (Umweltmonitoring, Überwachungsaufgaben, Minensuche u. Ä.) zu demonstrieren.

Gemeinsam ist den meisten dieser Einsatzfelder, insbesondere denen im nichtmilitärischen Bereich, dass sie nur kurzfristige bzw. punktuelle Einsätze erfordern. Da für viele dieser Aufgaben keine schwere Nutzlast oder zahlenmäßig große Besatzung mitgeführt werden müssen, sind auch kleinere und einfacher konstruierte Luftschiffe (z. B. auch existierende Heißluftschiffe) in der Lage, diese Einsätze – zumindest teilweise – abzudecken. Für Langzeiteinsätze (mehrere Tage) sind die bestehenden Luftschiffe allerdings zu klein.

Diese Märkte können von Luftschiffbetreibern als Mitnahmemarkt bedient werden, wenn die geforderte Ausrüstung erprobt und verfügbar ist. Luftschiffverkäufe an Endkunden sind in diesen Feldern nicht zu erwarten. Dennoch wird das Marktpotenzial – insbesondere für Umweltkontrolle und Küstenüberwachung – mit ca. 50 Luftschiffen weltweit angegeben (Zeppelin 2003).

Je nach Anforderungsprofil der konkreten Aufgabe, d.h. vor allem bezüglich der Größe der abzudeckenden Fläche, der Überwachungsintensität sowie der Genauigkeit, konkurriert ein Luftschiff mit Hubschraubern, Flugzeugen und Satelliten. Luftschiffe besitzen gegenüber Hubschraubern und Flugzeugen Vorteile, wenn eine hohe Überwachungsintensität gefordert ist, gegenüber Satelliten erlauben Luftschiffe eine präzisere Beobachtung von kleineren Strukturen. Vorteile besitzen Luftschiffe auch für einige Anwendungen wegen ihrer Lärm- und Vibrationsarmut (z. B. beim Umweltmonitoring oder wenn vibrationsempfindliche Sensoren eingesetzt werden sollen).

Tabelle 2

#### Überblick über mögliche Aufgaben für Luftschiffe als Missionsplattform

privatwirtschaftlich	hoheitlich	militärisch
– TV-Übertragung	– Verkehrsüberwachung	– Seeraumüberwachung
– wissenschaftliche Untersuchungen	– Grenzkontrolle	– Grenzsicherung
– Photogrammetrie und Kartographie	– Umweltmonitoring	– Signal Intelligence (SIGINT)
– Sensorerprobung im Forschungs- und Vorentwicklungsstadium	– Fischereizonenüberwachung	– Communication Intelligence (COMINT)
– Sondereinsätze meist in Zusammenhang mit Events (Fallschirmabsprünge, Einfliegen von neuen Produkten)	– Katastropheneinsätze	– Aufspüren von Minen und Sprengstoff
	– fliegende Kommandozentrale bei Großveranstaltungen	
	– fliegende Relaisstation für Sonderkommunikation	
	– Luftüberwachung von kriminellen lokalen Zentren	
	– polizeiliche Überwachung von Großereignissen (Olympische Spiele)	

Trotz der aufgeführten Vorteile müssen einige durch die Bauart bedingten Betriebseinschränkungen und Besonderheiten als Markthemmnisse für die Einführung von Luftschiffen als Missionsplattformen bewertet werden. Wesentlich sind vor allem die folgenden Aspekte:

- Einsatz ist wetterabhängig (Wind, Vereisung)
- keine schnelle Verlegung zu potenziellen Einsatzorten möglich
- kein Einsatz in Gefährdungsgebieten (Abschussgefahr)
- Luftschiffe sind in bestehende Infrastruktur (Ausbildung, Wartung, Hangar, etc.) schwer integrierbar
- organisatorischer Aufwand des Luftschiffbetriebes

Hinzu kommt, dass im hoheitlichen Bereich die Auswahl- und Beschaffungswege insbesondere bei neuen Systemen komplex und langwierig sind. Die Knappheit bei öffentlichen Kassen lässt eine Neueinführung insbesondere dann nicht erwarten, wenn die Aufgaben zum Teil durch konventionelle Systeme abgedeckt werden können. Erst wenn deutliche Vorteile bei Kosten und/oder Anwendungsspektrum möglich sind, könnte der Einsatz von Luftschiffen in diesem Bereich attraktiv werden.

#### 4. Personentransport

Der Sektor Personentransport unterscheidet sich vom Bereich Tourismus insofern, als noch höhere Anforderungen an Zuverlässigkeit und Pünktlichkeit zu stellen sind, die mit herkömmlichen Luftschiffen nur schwer realisierbar sind. Eine Ausnahme davon wäre nur in Fällen gegeben, in denen andere Beförderungsmittel nicht zur Verfügung stehen oder ähnlichen Einschränkungen wie Luftschiffe unterliegen, z. B. Personentransporte zu schwer zugänglichen Orten, etwa Inseln ohne Flughafeninfrastruktur. Allerdings verlangt diese Einsatzmöglichkeit Luftschiffe mit relativ großer Kapazität und niedrigen Flugstundenpreisen, also Voraussetzungen, die zurzeit noch nicht vorhanden sind (Zeppelin 2003).

Für die Personenbeförderung im Linienbetrieb (sog. „scheduled flights“), kommt vor allem ein Shuttle-Betrieb zwischen großstädtischen Zentren in Betracht. Wichtig für einen Städteshuttle sind eine hohe Flugeschwindigkeit, die zuverlässig auch unter schwierigen Wetterbedingungen erreicht wird (Einhaltung des Flugplanes), sowie hohe Passagierzahlen (Senkung der Flugkosten). Die Fähigkeit, senkrecht zu starten und zu landen, ist wünschenswert, damit von innerstädtischen Stationen aus operiert werden kann.

Hierfür kommen vor allem zwei Strategien in Betracht: Erstens könnten Luftschiffe mit sehr leistungsstarken Motoren ausgerüstet werden, um auch gegen starke Winde noch die geplante Reisegeschwindigkeit zu erreichen. Dies würde aber die Umweltvorteile (geringer Treibstoffverbrauch, geringe Lärmemission), die Luftschiffe vielfach gegenüber anderen Verkehrsträgern haben – zumindest teilweise –, zunichte machen. Eine zweite Strategie wäre die Entwicklung von Hybridluft-

schiffen, die einen Teil ihres Auftriebs aerodynamisch (wie ein Flugzeug) erzeugen. Dies setzt grundsätzliche technologische Neuentwicklungen voraus. Einige Konzeptstudien existieren hierfür bereits. (Kröplin 2003)

#### 5. Güterverkehr/Lastentransport

Der Cargomarkt wird durch die konventionellen Verkehrsträger LKW, Schiff und Flugzeug (Hubschrauber) weitgehend abgedeckt. Mögliche Nischen für Luftschiffe liegen vor allem im Bereich der Schwer- und Spezialtransporte, wo die konventionellen Transportmittel an ihre Leistungsgrenzen kommen.<sup>22</sup>

Eine weitere Nische wäre möglicherweise der Transport von sehr voluminösen Gütern mit geringer Dichte, bei denen wegen der Laderaumbeschränkung des Flugzeuges das Tragvermögen nicht ausgenutzt werden kann, z. B. Blumen oder Elektronik-Komponenten.

Ein entscheidender Vorteil von Luftschiffen wäre die Realisierung eines Punkt-zu-Punkt-Transportes von Gütern. Da oftmals Umschlag- und Liegezeiten für die effektive Geschwindigkeit der Transportkette eine größere Bedeutung haben als die maximale Geschwindigkeit des Transportmittels, könnte ein Punkt-zu-Punkt-Transport den Geschwindigkeitsnachteil von Luftschiffen gegenüber Flugzeugen relativieren oder sogar aufheben. Auch würden hier die technischen Möglichkeiten von Luftschiffen, insbesondere die Fähigkeit senkrecht zu starten und zu landen sowie Lasten schwebend aufzunehmen bzw. abzusetzen, optimal genutzt. Bei schwebender Lastaufnahme bewegt sich das Luftschiff ab einer Transportkapazität von 40 t bei mehr als 6 m Breite in einem bisher nicht bedienten Marktsegment.

Insbesondere in Gebieten mit überlasteter (Ballungsgebiete) oder unterentwickelter Infrastruktur (Straße, Schiene, Umladekräne) stellt das Luftschiff einen zusätzlichen neuen Transportweg dar, der lediglich an der Be- und Entladestelle auf eine Infrastruktur angewiesen ist.

Ein dezidiertes Interesse am Einsatz von Luftschiffen gibt es für eine Reihe von Missionen (Zeppelin 2003), z. B.:

- Montage von Windkraftanlagen in unwegsamem Gelände und offshore
- Montage von Pipelines und offshore-Anlagen
- Transport von Fertighausteilen in Entwicklungsländern
- Holzabtransport aus unwegsamem Gelände
- Versorgung im Katastrophenfall (Überschwemmung, Erdbeben, Dürre, etc.)

<sup>22</sup> Die leistungsfähigsten Fluggeräte für den Schwerlasttransport sind zurzeit die Antonov 124 und Airbus A380 (in der Entwicklung) mit einer maximalen Zuladung von 150 t und für großvolumige bzw. sperrige Güter der Airbus A300 600ST „Beluga“, der Frachtgut mit maximalen Abmessungen von 7,8 m x 7,4 m x 37,7 m aufnehmen kann.

- Versorgung von schwer zugänglichen Industrieansiedlungen (Nordkanada, Sibirien, Urwaldgebiete)
- Versorgung von hoheitlichen Außenstellen
- „Luftföhrentransport“ von LKW- und Bahncontainern über Flüsse, Häfen und Gebirge
- Transport von Airbus-Baugruppen zu den Montageorten

Marktstudien aus den 1990er-Jahren bezifferten das Marktvolumen für Transportluftschiffe von der Größe eines CargoLifters (160 t Zuladung) auf eine Stückzahl von 200 Schiffen weltweit (Kröplin 2003).

Allerdings kann die für die Wettbewerbssituation von Luftschiffen im Cargo-Markt letztlich entscheidende Frage, zu welchen Preisen Fracht befördert werden könnte, zurzeit nicht präzise beantwortet werden, da es keine praktischen Erfahrungen mit Schwerlastluftschiffen gibt.

Da viele der für Luftschiffe prinzipiell interessanten Marktsegmente nur punktuellen bzw. unregelmäßigen Bedarf aufweisen, könnte sich das Erreichen einer hohen Auslastung – auf Grund der langsamen Geschwindigkeit und damit langer Verlegungszeiten – als schwierig erweisen. Eine hohe Auslastung ist aber unabdingbar für einen wirtschaftlichen Betrieb.

Obwohl der Cargomarkt ein interessantes Feld mit Zukunftspotenzial zu sein scheint, ist es zum gegenwärtigen Zeitpunkt fraglich, ob der Markt im zivilen Bereich ausreichend groß ist, damit potenzielle Investoren den hohen finanziellen Einsatz und das hohe Risikopotenzial der Entwicklung von Schwerlastluftschiffen auf sich nehmen. Dies gilt besonders, da gleichzeitig der Aufbau von Luftschiffinfrastruktur und Betreibergesellschaften mitfinanziert werden muss.

Als Marktchance wird daher vielfach eine militärisch finanzierte Basisentwicklung gesehen (Zeppelin 2003). Die US-Streitkräfte sehen in jüngster Zeit – vor allem seit Beginn des Irak-Kriegs – einen verstärkten Bedarf an Transportkapazitäten, um Truppen und Gerät weltweit direkt zum Einsatzort verlegen zu können. Auf der Grundlage dieses Bedarfs hat die amerikanische Agentur DARPA (Defense Advanced Research Projects Agency) Anfang dieses Jahres mit der Konzeptdefinition eines Frachtluftschiffs begonnen, das 500 t Fracht (eine militärische Einheit inklusive Soldaten und Gerät) interkontinental direkt zum Einsatzort transportieren können soll. Dieses, „WALRUS“ genannte, Projekt wäre das mit Abstand größte Luftschiff aller Zeiten.

## 6. Stratosphären-Plattformen

Stratosphären-Plattformen unterscheiden sich von den oben genannten Einsatzbereichen und Märkten für Luftschiffe dadurch, dass die Schiffe in großer Höhe (ca. 20 km) in der Stratosphäre operieren. Sie eignen sich vor allem für zwei Einsatzfelder: als Relais-Stationen für die Telekommunikation sowie als Plattformen für Überwachungsaufgaben. Das erste Feld ist zivil, das zweite militärisch dominiert.

## Telekommunikation

Der Markt für Telekommunikationsdienste zeichnet sich durch ein rasantes Wachstum aus, vor allem in den Bereichen multimediale Breitband-Übertragung und Mobilfunk. Die hierfür benötigte Infrastruktur ist zurzeit terrestrisch, z. B. Sendemasten, Kupfer- und Glasfaserkabel, oder weltraumgestützt (Satelliten). Wegen der hohen Wachstumsraten wird diese Infrastruktur gegenwärtig progressiv ausgebaut, was hohe Investitionen der Telekommunikationsunternehmen erforderlich macht. Daher erscheinen Stratosphären-Plattformen als Alternative oder Ergänzung zur bestehenden Infrastruktur attraktiv.

Ein in der Stratosphäre als Relaisstation über einem Gebiet stationiertes Luftschiff wäre technisch in der Lage, ein Zielgebiet mit einem Durchmesser von bis zu 400 km mit Breitbanddiensten zu versorgen. Ein Land wie die Bundesrepublik Deutschland beispielsweise könnte mit ca. 10 Stratosphären-Plattformen vollständig abgedeckt werden.

Gegenüber Kommunikationssatelliten besitzen Stratosphären-Plattformen eine ganze Reihe von Vorteilen. Eine Plattform kann stationär über jedem Ort eingesetzt werden und diesen – z. B. eine Großstadt – kontinuierlich mit Kommunikationsdiensten versorgen. Für dieselbe Aufgabe benötigt man 3 bis 4 Satelliten in niedriger Erdumlaufbahn. Im Gegensatz zu Satelliten wären Stratosphären-Plattformen zur Wartung, Reparatur oder Ausstattung mit neuer Hardware und Software rückholbar. Insgesamt wären sie vermutlich deutlich billiger als Satelliten.

Gegenwärtig werden auch Konzepte entwickelt, bei denen Satelliten und Luftschiffe mit ihren je eigenen Stärken im Verbund die Stützpfeiler der Kommunikations-Infrastruktur bilden (Abb. 10).

Als Markthemmnisse werden primär die hohen Entwicklungskosten und das hohe Risikopotenzial bei der Entwicklung genannt. Wichtige Technologien hierfür sind noch relativ weit von der Einsatzreife entfernt, z. B. in den Bereichen Antrieb/Energieversorgung oder Hüllwerkstoffe. Eine daraus resultierende längere Entwicklungszeit wäre insofern problematisch, als der Aufbau der Kommunikationsinfrastruktur in der Zwischenzeit dynamisch voranschreitet und die Marktlücke damit immer kleiner werden könnte, wenn nicht die Nachfrage ebenso beschleunigt zunimmt. Attraktiv wären Stratosphären-Plattformen in diesem Fall eventuell noch für Entwicklungs- und Schwellenländer mit weniger gut ausgebauter Infrastruktur.

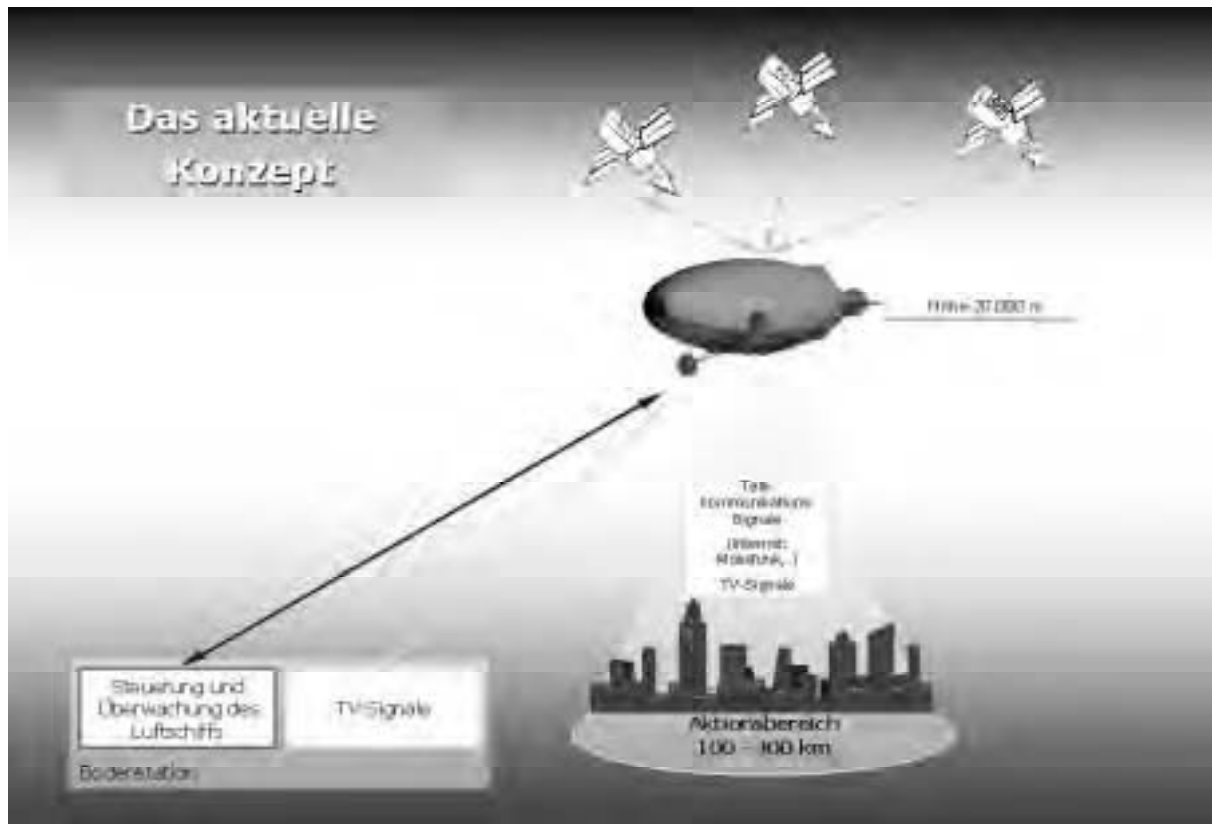
## Überwachung

Stratosphären-Plattformen bieten attraktive Perspektiven beim Einsatz für Aufklärungs- und Überwachungsmissionen. Besonders in den USA werden verstärkt neue Aufklärungs-, Erkennungs- und Frühwarnsysteme diskutiert, und in diesem Zusammenhang wird auch über den Einsatz von Luftschiffen nachgedacht.

Im Überwachungsmarkt konkurrieren Stratosphären-Plattformen vor allem mit Satelliten bzw. mit bemannten

Abbildung 10

## Einsatzkonzept Stratosphären-Plattform für Telekommunikation



Quelle: Zeppelin 2003, S. 104

und unbemannten Aufklärungsflugzeugen (Drohnen). Gegenüber Satelliten haben sie den technologischen Vorteil einer ca. 50-mal höheren Auflösung und Sensitivität. Anders als Aufklärungsflugzeuge bieten sie die Möglichkeit einer lang andauernden kontinuierlichen Überwachung größerer Gebiete. Neben Aufklärung können zusätzlich Datenübertragungsaufgaben für Kommunikation und Zielführung auch im Verbund mit Satelliten übernommen werden.

Ihr Einsatz wird daher vor allem in den USA zur Grenzüberwachung im Zuge der „Homeland Defense“ sowie als Überwachungs- und Kommunikationsschnittstelle im Kampfeinsatz erwogen (Abb. 11).

Für die Grenzüberwachung der USA sind gemäß einer Konzeptstudie 10 Höhenluftschiffe notwendig, für Japan beispielsweise würden fünf Luftschiffe benötigt. Geht man von der Annahme aus, dass die meisten Industrie- und Schwellenländer vergleichbare Systeme einsetzen würden und dass die Plattformen ein Jahr ununterbrochen betrieben werden können, so könnte der weltweite Markt einschließlich der Ersatz- und Austauschgeräte eine Größe von etwa 100 bis 200 aufweisen (Zeppelin 2003).

Die Tatsache, dass die USA in diesem Feld eine Reihe von offenbar aufeinander abgestimmten militärischen

Entwicklungsprogrammen betreibt (HAA (High Altitude Airship), TARS (Tethered Aerostat Radar System), THOR (Tera Hertz Operational Reachback), ISIS (Integrated Sensor is Structure)), lässt vermuten, dass das Thema eine hohe Priorität erhalten hat. Eine hohe militärische Priorität könnte damit einhergehen, dass – wie in vielen militärischen Entwicklungsprogrammen – Kostenerwägungen zumindest teilweise in den Hintergrund gedrängt werden und nicht die dominierende Rolle einnehmen, wie in der zivil finanzierten Produktentwicklung.

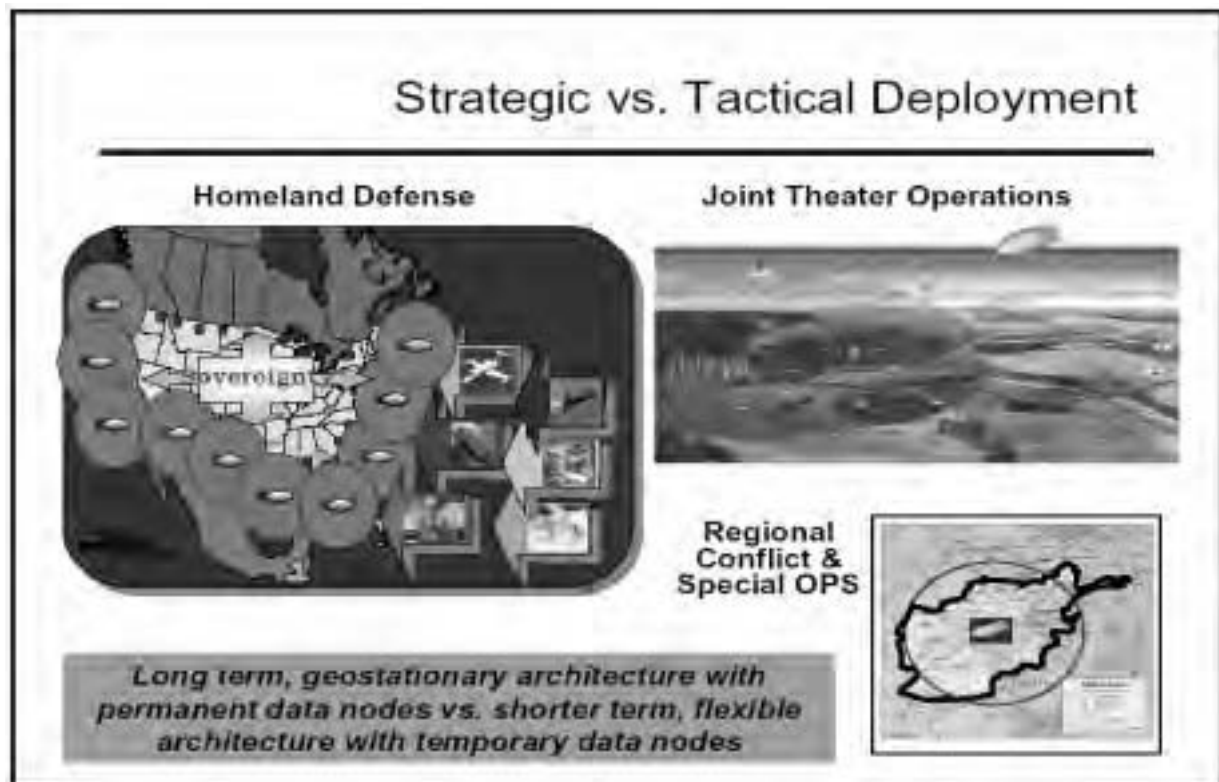
Von vielen Experten im Feld der LaL-Technologie wird eine Chance darin gesehen, dass eine militärisch getriebene Basisentwicklung einen Technologie-Push auslösen könnte, der auch der zivilen Anwendung der LaL-Technologie neue und erweiterte Perspektiven eröffnen könnte.

## 7. LaL für sich entwickelnde Länder

Oftmals werden Luftschiffe pauschal als besonders attraktiv für den Einsatz in sich entwickelnden Ländern angesehen. Als Grund hierfür wird die fehlende oder mangelhafte Infrastruktur zum Personen- bzw. Gütertransport angegeben. Allerdings ist hier eine differenzierte Betrachtung je nach konkretem Einsatzgebiet erforderlich.

Abbildung 11

## Einsatzszenarien von Stratosphären-Plattformen für Überwachungsaufgaben der USA



Quelle: ACQ (2004)

In den Ballungszentren der sich entwickelnden Länder unterscheiden sich die Anforderungen und Anwendungspotenziale nur unwesentlich von denen in entwickelten Ländern. Beispielsweise sind die Bedingungen für den Einsatz von Luftschiffen für Werbung und Tourismus dort nahezu dieselben wie in Industrieländern.

Aber auch in Bereichen, für die Luftschiffe prädestiniert zu sein scheinen, z. B. der Gütertransport in entlegene Gebiete, ist eine fallbezogene Analyse unter Berücksichtigung der konkreten Bedingungen vor Ort angezeigt. Beispielsweise werden Luftschiffe in Industrieländern für Sondertransporte von überschweren bzw. sperrigen Lasten als besonders attraktiv angesehen. Sondertransporte mit gängigen Mitteln sind hier gerade wegen der Beschränkungen durch die bestehende Infrastruktur sehr aufwendig. In sich entwickelnden Ländern ist es dagegen außerhalb der Ballungszentren zumeist ohne große Schwierigkeiten möglich, vorhandene Straßen und Wege temporär zu verbreitern, Schneisen durch Grundstücke zu legen, Gebäude abzureißen und mit vergleichsweise geringen Entschädigungsleistungen die Besitzer zur Zustimmung zu bringen. Der Vorteil eines Luftschiffes würde in solchen Fällen nicht voll zum Tragen kommen (Gebhardt 2004).

Daneben darf nicht übersehen werden, dass Transporte großer und sperriger Güter in Gebiete ohne adäquate In-

frastruktur in aller Regel keine Einzelaktivität sind. So muss beispielsweise für den Bau eines Kraftwerkes nicht nur eine Generator-Turbineneinheit transportiert werden, die möglicherweise vorteilhaft mit einem Luftschiff erfolgen könnte, es muss auch der Rest dieses Kraftwerkes gebaut und die dafür notwendigen Materialien herangeschafft werden. Hierfür müsste ohnehin ein Transportweg errichtet werden, der dann gleich so ausgelegt werden kann, dass alle Elemente und Materialien herantransportiert werden könnten (Gebhardt 2004).

Ein Feld mit Zukunftspotenzial könnten Spezialeinsätze im hoheitlichen und zivilen Bereich sein, wie z. B. die Sicherung der Landesgrenzen, die Überwachung von Goldminen, Erdölfeldern, Pipelines u. Ä., die Kontrolle von Wäldern und landwirtschaftlichen Anbaugebieten, der Krankentransport sowie die Detektion von Landminen. Die Herausforderung besteht vor allem darin, zur Abdeckung dieses Aufgabenspektrums angepasste technologische Optionen zu entwickeln, die weder die technologische noch die finanzielle Basis der Einsatzländer überfordern.

Für solche Einsätze müsste ein Fluggerät in etwa folgendes Anforderungsprofil erfüllen (Gebhardt 2004):

- Zuladung von 2 bis 4 Personen zusätzlich zum Piloten
- Reichweite von etwa 200 km

- vor Ort stationierbar
- Wartung und Instandsetzung mit vor Ort beherrschbaren Technologien
- Reisegeschwindigkeit von 60 bis 80 Stundenkilometern

In diesem Sektor stehen Luftschiffe in direkter Konkurrenz vor allem zu Hubschraubern. Hubschrauber besitzen allerdings eine Reihe von Nachteilen. Sie sind in der Anschaffung und in der Wartung sehr teuer, setzen eine ausgebauten Ersatzteilinfrastruktur und gut ausgebildete Piloten sowie Wartungs- und Instandsetzungspersonal voraus. Darüber hinaus haben sie einen sehr hohen Kraftstoffverbrauch und sind anfällig gegen Verschmutzung.

Im Sinne des Einsatzes von angepasster Technologie kommen daher vor allem Heißluftschiffe für diesen Bereich in Betracht. Sie sind vergleichsweise einfach aufgebaut und das zu ihrem Betrieb erforderliche technische Know-how ist überschaubar. Sie benötigen kein teures Treibgas (Helium) und können zusammengelegt werden, wenn sie nicht im Einsatz sind. Sie können in einem Autoanhänger bis zu einem geeigneten Einsatzort transportiert oder von einer Stelle abgeholt werden, an der der Einsatz beendet worden ist oder die Mission aus bestimmten Gründen abgebrochen werden muss.

## 8. Fazit

Werbung und Tourismus (Rundflüge) sind die etablierten kommerziellen Einsatzfelder der derzeit existierenden kleinen und mittelgroßen (Zeppelin NT) Luftschiffe. Diese Felder können sich von den erprobten Technologien ausgehend schrittweise weiterentwickeln. Größere Technologiesprünge sind hierfür nicht erforderlich. Der Einsatz dieser Luftschiffe als Missionsplattformen (z. B. für TV-Übertragungen, Umweltmonitoring oder Minensuche) bietet sich vor allem als Mitnahmemarkt an.

Zukunftspotenziale könnten sich für die LaL-Technologie insbesondere bei Stratosphären-Plattformen für Telekommunikation und Überwachungsaufgaben sowie im Cargo-Markt eröffnen. Diese Märkte können nur mit großen Luftschiffen von 250 m Länge und mehr bedient werden. Der für die Entwicklung dieser Luftschiffe notwendige Technologieschritt ist groß, einige der benötigten Technologien befinden sich noch im Stadium der Grundlagenforschung.

In Anbetracht der langen Entwicklungszeiten und der hohen Kosten für die Entwicklung von Großluftschiffen, ist es fraglich, ob in absehbarer Zeit Investoren dieses hohe Risiko eingehen. Aus diesen Gründen wird von vielen Experten eine Chance darin gesehen, dass eine militärisch getriebene Basisentwicklung die LaL-Technologie entscheidend voran bringen könnte.

## IV. Handlungsoptionen

Deutschland nimmt zurzeit noch eine international führende Position in der LaL-Technologie ein. Allerdings wird diese Technologieführerschaft in jüngster Zeit durch

groß angelegte Entwicklungsprogramme insbesondere in den USA und Japan in Frage gestellt.

Führend ist Deutschland gegenwärtig auch beim Know-how auf dem Gebiet der Luftfahrt-Zulassung und der für den sicheren Betrieb von Luftschiffen erforderlichen rechtlichen Rahmenbedingungen. Eine Weiterentwicklung dieses Feldes ist von großer Bedeutung für die Zukunftsperspektiven von neuen und größeren Luftschiffen.

Wie dargestellt, weist die LaL-Technologie attraktive Potenziale vor allem im Bereich Stratosphären-Plattformen für Telekommunikation, aber auch in den Bereichen Tourismus und Cargo auf. Aus den bereits genannten Gründen aber – Zielmärkte sind Nischenmärkte, hoher finanzieller und Zeitaufwand für die Entwicklung, Risiko des Scheiterns – und vor dem Hintergrund der Erfahrungen mit LaL-Projekten ist in nächster Zeit eine rein privat getragene Entwicklung in größerem Umfang nicht sehr wahrscheinlich.

Zur Unterstützung der Ausschöpfung dieser Potenziale durch staatliches Handeln kommt eine Reihe von Handlungsoptionen in Frage, die im Folgenden skizziert werden. Diese könnten jeweils einzeln oder aber in Kombination miteinander gewählt werden, so dass eine abgestimmte und gestufte Strategie zur Förderung der LaL-Technologie entwickelt und umgesetzt werden könnte.

### 1. Synergien fördern

LaL ist eine Technologie, die sich weniger durch grundlegende Neuentwicklungen auszeichnet, als durch Adaption und Integration von technologischen Fortschritten, die auf anderen Gebieten erzielt werden. Daher wäre es vordringlich, das Zusammenführen von Technologien aus den unterschiedlichsten Bereichen, zu fördern. Auf der anderen Seite sind viele der für Luftschiffe benötigten Technologien auch Schlüsseltechnologien in anderen Branchen, so dass hier Synergien entstehen, die gefördert und genutzt werden könnte. Einige Beispiele hierfür sind in Tabelle 3.

Forschungs- und Entwicklungsaktivitäten könnten in Zusammenarbeit mit diesen Branchen vorangetrieben und anschließend adaptiert werden. Diese Adaption stellt zwar ebenfalls eine aufwendige Forschungs- und Entwicklungsaufgabe dar, macht aber, verglichen mit einer Eigenentwicklung, nur einen Bruchteil der Gesamtaufwendungen aus. Dadurch könnte mit überschaubarem Mitteleinsatz die Know-how-Basis verbreitert und ein substanzieller Beitrag zur Weiterentwicklung der LaL-Technologie geleistet werden.

### 2. Aufbau einer „Leichter-als-Luft“-Forschungs- und Entwicklungsstelle

Die Weiterentwicklung LaL-Technologie erfordert Fortschritte auf einem breiten technologischen Feld mit hohen Entwicklungsrisiken. Damit diese Aufgabe von den Akteuren, die die LaL-Forschung und -Entwicklung betreiben, gemeistert werden kann, wäre eine logistische und



Tabelle 3

**Mögliche Synergieeffekte**

<b>Luftschiff</b>	<b>alternative Einsatzmöglichkeiten</b>
Leichtbaustrukturen	Luftfahrt, Bauindustrie, Robotik
Hüllenmaterialien, technische Textilien	Bauindustrie (Traglufthallen, flexible Dächer)
UV-beständige Kunststoffe	Fahrzeuge, Luftfahrt
Heliummanagement	Anlagen- und Behälterbau
Blitzschutz	Windkraftanlagen, Luftfahrt
Regenerative Antriebe	Fahrzeuge, Solaranlagen, Raumfahrt, Luftfahrt

Quelle: eigene Zusammenstellung

koordinierende Unterstützung hilfreich. Hierzu käme der Aufbau einer „Leichter-als-Luft-Forschungs- und Entwicklungsstelle“ in Frage.

Eine vordringliche Aufgabe dieser Stelle wäre es, Kooperationen der Akteure der LaL-Forschungslandschaft zu fördern. Diese ist in Deutschland relativ gut überschaubar: Sie besteht gegenwärtig aus einigen kleinen bzw. mittelständischen Unternehmen und einer Reihe von Universitätsinstituten sowie Einzelpersonen. Kooperationen zwischen diesen Akteuren erfolgen zwar projektbezogen, aber insgesamt gesehen nicht sehr intensiv.

Eine weitere wichtige Aufgabe wäre es, das vorhandene Know-how zusammenzutragen und mit dem Ziel der Vermarktung aufzubereiten. Das deutsche Know-how zur LaL-Technologie ist weltweit führend, aber weit verstreut und teilweise nicht leicht öffentlich zugänglich. Ein Beispiel hierfür ist das HALE-Projekt der Europäischen Weltraumagentur ESA, dessen Ergebnisse – obwohl durch öffentliche Mittel finanziert – der Öffentlichkeit nicht zur Verfügung stehen. Eine Forschungs- und Entwicklungsstelle könnte vorhandenes Fachwissen bündeln und zur Verfügung stellen und so als Multiplikator wirken.

Analysiert man LaL-Projekte, so stellt man fest, dass es bei der Produktentwicklung durchgehend an einer Systematik mangelt, wie sie in anderen Branchen – beispielsweise im Automobil- oder Flugzeugbau – selbstverständlich ist. Von den drei Hauptelementen bei der Produktentwicklung – Entwicklung und Erprobung, Zulassung und Serienreifmachung sowie Markteinführung – ist den letzten beiden Punkten bislang zumeist zu wenig Augenmerk geschenkt worden. Insbesondere Zulassungsanforderungen müssen aber bereits sehr früh in der Konzeptentwicklung mit bedacht werden, da ansonsten das Risiko des späteren Scheiterns bei der Zulassung ansteigt. Daher wäre die Erstellung einer Produktentwicklungssys-

tematik mit der Qualität eines Entwicklungstools für zukünftige LaL-Projekte ein zentraler vorwettbewerblicher Arbeitsschwerpunkt der FuE-Stelle. Hierzu gehört auch die enge Zusammenarbeit mit den zuständigen Behörden auf dem Gebiet der Normung und der Vorschriften.

Die FuE-Stelle könnte beispielsweise an einer geeigneten Fachhochschule angesiedelt werden, da diese für den notwendigen Brückenschlag zwischen Forschung, Entwicklung und industrieller Anwendung prädestiniert wäre. Die Finanzierung könnte sich aus einer Grund- und Anschubfinanzierung der öffentlichen Hand und Projektmitteln aus Kooperationen mit Industriepartnern zusammensetzen.

### **3. Wissensbasis verbreitern und Erfahrungsaustausch intensivieren**

Eine weitere Möglichkeit, das relativ weit verstreute Wissen zu bündeln, ist es, den wissenschaftlichen Austausch in Deutschland, aber auch weltweit zu fördern. Gegenwärtig gibt es vor allem drei Foren, in denen ein geistiger und wissenschaftlicher Austausch stattfindet. Dies ist in den USA die Fachgruppe „Lighter Than Air“ (LTA) des American Institute of Aeronautics and Astronautics (AIAA), in England die Airship Association und in Deutschland die Fachgruppe Leichter-als-Luft der Deutschen Gesellschaft für Luft- und Raumfahrttechnik (DGLR).

Die DGLR veranstaltet regelmäßig Konferenzen zu LaL und verwandten Themen, es wäre aber zu erwägen, Aktivitäten wie diese – auch im europäischen Rahmen – zu verstärken.

Im CargoLifter Projekt ist umfassend Forschung und Entwicklung betrieben und das Know-how zur LaL-Technologie in vielen Punkten entscheidend erweitert worden. Vieles von den gewonnenen Erkenntnissen und Erfahrungen wurde im Zuge der Insolvenz der CargoLifter AG

nicht systematisch ausgewertet und dokumentiert. Zwar wurde aus der Insolvenzmasse der CargoLifter AG eine Firma (Air Brand GmbH) ausgegründet, deren Aufgabe es ist, das vorhandene Know-how zu sichern. Ein Großteil des Wissens steckte jedoch „in den Köpfen“ der beteiligten Ingenieure und ging mit deren Fortgang zunächst verloren.

Ein Ansatzpunkt, zumindest einen gewissen Teil davon zu sichern, ist das Hearing vom 11. Juli 2002, das vom CargoLifter Insolvenzverwalter veranlasst wurde und an dem sich ein Großteil der Experten auf dem Gebiet beteiligt haben. Es böte sich an, die Beiträge dieses wissenschaftlich hochrangigen Symposiums aufzubereiten und der Öffentlichkeit zugänglich zu machen.

#### 4. Verlässliche Regeln und Standards schaffen

Zur Entwicklung, zum Bau und zum Betrieb von Luftfahrtgeräten sind allgemein gültige und international harmonisierte Regeln und Standards erforderlich. Für Luftschiffe existieren solche Vorschriften nur rudimentär, von einer internationalen Harmonisierung kann keine Rede sein. Deshalb operieren heutige Luftschiffe regelmäßig mit Ausnahmegenehmigungen, über deren Erteilung von Fall zu Fall entschieden wird.

Die Schaffung und Überwachung von Regularien ist eine originär hoheitliche Aufgabe. Seit September letzten Jahres ist die European Aviation Safety Agency (EASA) in Zusammenarbeit mit dem Luftfahrt-Bundesamt für Sicherheitsfragen im Luftverkehr für damit zusammenhängende Regulierungen zuständig. Eine proaktive Rolle von Luftfahrt-Bundesamt und EASA bei der Ausarbeitung und internationalen Harmonisierung dieser Regularien wäre wünschenswert. Meist wird dazu eine intensive entwicklungsbegleitende Kooperation mit Hersteller- und Betreiberunternehmen erforderlich sein. Für zukünftige LaL-Projekte in Deutschland könnte es sich als großer Wettbewerbsvorteil erweisen, wenn die Basis internationaler Vorschriften maßgeblich in Deutschland erarbeitet werden würde.

#### 5. Flexibles Förderprogramm auflegen

Unter der Bedingung, dass eine Ausschöpfung der dargestellten Potenziale der LaL-Technologie als wirtschaftlich und gesellschaftlich wichtig eingeschätzt wird und die Technologieführerschaft Deutschlands auf diesem Gebiet erhalten werden soll, wäre es erwägenswert, ob die öffentliche Hand ein breit angelegtes Förderprogramm auflegen sollte, um die technologische Machbarkeit insbesondere von Stratosphärenplattformen und Luftschiffen zum Schwerlasttransport zu demonstrieren sowie den Bau von Prototypen voranzutreiben. Um realistische Aussichten auf Erfolg zu haben, müsste eine Förderstrategie langfristig ausgerichtet sein, etwa mit einer Zeitperspektive von 10 bis 15 Jahren. Orientierung könnten beispielsweise die Stratosphären-Plattform-Programme in USA und Japan bieten (siehe Kasten).

#### Stratosphären-Plattform-Programme in USA und Japan

USA: High Altitude Airship Programm (HAA) der Missile Defence Agency

- Phase 1: (2002) Machbarkeitsstudie (Lockheed-Martin) (2 Mio. Dollar)
- Phase 2: „design and risk reduction contract“ (40 Mio. Dollar) soll Mitte 2004 beendet sein.
- Phase 3 (projektiert): Entwicklung eines Prototypen bis 2006 (50 Mio. Dollar)
- Bewertungsphase (2006 bis 2008) (9 Mio. Dollar)
- Bei positivem Ausgang sollen anschließend Luftschiffe in Serie entwickelt und gebaut werden.

Japan:

- Phase 1: (1998–2004) Entwicklung von verkleinerten Demonstratoren für wesentliche Technologien. 130 Mio. Euro
- Phase 2: (ab 2005) Demonstrationsprogramm für ein Luftschiff mit ca. 150 m Länge. 140 bis 270 Mio. Euro je nach Umsetzungskonzept
- Phase 3: Einsatz von Serienluftschiffen (ab 2010)

Auf jeden Fall wären ein schrittweises Vorgehen mit regelmäßigen Überprüfungen der Projektfortschritte und die Festlegung von Umsteuerungs- bzw. Abbruchkriterien zu empfehlen. Nach Expertenmeinung könnte ein Förderprogramm folgende Schritte umfassen (Kröplin 2003):

- Ausschreibung von mehreren Vorstudien, um bestehende Konzepte aufzuarbeiten und zu bewerten. Dauer ca. sechs Monate bei Kosten von ca. 2 Mio. Euro pro Konzept.
- Durchführung von Konzeptstudien in den Bereichen Stratosphärenplattform, Schwerlast und Hybrid-Konzepte. Dauer ca. zwei Jahre mit Kosten von je ca. 40 Mio. Euro.
- Gezielte Weiterförderung ausgewählter Konzepte mit dem Ziel des Baus von Prototypen. Dauer ca. drei Jahre, Kosten je ca. 100 Mio. Euro.
- Erprobungsphase der Prototypen. Dauer ca. zwei Jahre, Kosten je 10 Mio. Euro, die anschließend in die Kommerzialisierung gebracht würden.

Ein solches Programm würde ein erhebliches Engagement der öffentlichen Hand bedeuten. Vertretbar wäre dies nur, wenn gleichzeitig in erheblichem Umfang industrielle Eigenmittel mobilisiert werden könnten. Möglicherweise ist in Anbetracht des erforderlichen Finanzvolumens ein koordiniertes Vorgehen auf europäischer Ebene anzustreben. Dies hätte sowohl den Vorteil, dass die finanziellen Lasten auf mehrere Schultern verteilt werden würden, als auch, dass zusätzlich europäisches Know-how (z. B. von ATG aus England) eingebunden werden könnte.

## Literatur

### 1. In Auftrag gegebene Gutachten

Gebhardt, A. (2004): Gutachten zur Leichter als Luft-Technologie. Aachen

Kröplin, B. (2003): Leichter als Luft-Technologie – Innovations- und Anwendungspotenziale. Stuttgart

Mandel, M. (2003): Aspekte, warum die LaL-Technologie bisher nicht über den Prototypenstatus hinausgekommen ist. Meckenbeuren

Zeppelin (2003): Gutachten LTA-Technologie – Innovations- und Anwendungspotenziale nach Einschätzung und Erfahrung der Zeppelin Luftschifftechnik. Autoren: B. Sträter, R. Gritzbach, J. Fecher, F. Maugeri. Friedrichshafen

### 2. Weitere Literatur

ACQ (2004): Office of the Under Secretary of Defense for Acquisition, Technology and Logistics (<http://www.acq.osd.mil/mda/barbb/downloads/fy03actd.ppt>), zuletzt abgerufen am 9. November 2004

Bain, A., Schmidtchen, U. (2000): Ein Mythos verglüht. Warum und wie die „Hindenburg“ verbrannte. In: DWV-Info Nr. 4 ([http://www.dwv-info.de/publikationen/2000/dwv-info-4\\_2001.html](http://www.dwv-info.de/publikationen/2000/dwv-info-4_2001.html)), zuletzt abgerufen am 4. November 2004

Bock, J. K., Knauer, B. (2003): Leichter als Luft, Transport- und Trägersysteme, Hildburghausen

Busemeyer, K.L. (2002): Äußerungen von K. L. Busemeyer auf dem CargoLifter Hearing am 11. Juli 2002

DARPA (Defense Advanced Research Projects Agency) (2004): WALRUS – Heavy Lift Air Vehicle Design Program. Draft 29. April 2004. [http://www.defensetech.org/archives/Draft\\_Solicitation\\_Walrus.pdf](http://www.defensetech.org/archives/Draft_Solicitation_Walrus.pdf), zuletzt abgerufen am 5. November 2004

DELCON (Deutsche Luftfahrt Consult GmbH) (2004): Bedeutung eines Großluftschiffes für einen universellen Einsatzbereich im 21. Jahrhundert. Autoren: Henk, J., Zulkowski, R., v. Gablenz, C. Berlin

Dessler, A. J. (2004): The Hindenburg Hydrogen Fire: Fatal Flaws in the Addison Bain Incendiary-Paint Theory. University of Arizona, Tucson 2004. (<http://spot.colorado.edu/~dziadeck/zf/LZ129fire.pdf>), zuletzt abgerufen am 4. November 2004

Eguchi, K., Fujihara, T., Harada, K., Suzuki, M., Yokomaku, T. (2002): Paper-B2, 4th International Airship Convention and Exhibition, Cambridge

FTD (Financial Times Deutschland) (2004): Internetausgabe vom 1. Mai 2004, zuletzt abgerufen am 25. Oktober 2004

Hallmann, W. (2002): Ballone und Luftschiffe im Wandel der Zeit. Königswinter

Lockheed, M. (2004): High Altitude Airship (HAA) – A Multi-purpose Platform for the Joint Warfighter. Akron/Ohio. <http://www.lockheedmartin.com/data/assets/7966.pdf>, zuletzt abgerufen am 5. November 2004

Spiegel Online (2004): US-Milliardär Fossett stellt Weltrekord auf – Schnellster Zeppelin aller Zeiten. Spiegel Online vom 27. Oktober 2004 (<http://www.spiegel.de/panorama/0,1518,325243,00.html>), zuletzt abgerufen am 4. November 2004

Sträter, B. (2003): persönliche Mitteilung

Zeppelin Europe Tours (2004): <http://www.zeppelin-europe-tours.com/>

ZLT (Zeppelin Luftschifftechnik) (2004): Presseinformation vom 27.08.2004 [www.zeppelin-nt.com/docs/pressemit/AbbUeberf.pdf](http://www.zeppelin-nt.com/docs/pressemit/AbbUeberf.pdf), zuletzt abgerufen am 31. Januar 2005

## Anhang: Überblick über LaL-Projekte

### 1. Luftschiff-Projekte aus historischer Sicht

Die folgende Betrachtung soll einen Einblick in die Entwicklung der LaL-Technologie anhand einiger wesentlicher Meilensteine geben.

Die Geschichte der LaL-Technologie ist vor allem durch die großen Zeppeline (starrs Konzept) geprägt. Dabei sind vor allem zwei Meilensteine zu erwähnen: die Gründung der ersten kommerziellen Fluggesellschaft der Welt (Deutsche Luftschiffahrts-Aktiengesellschaft (DELAG) von Graf Zeppelin im Oktober 1909) sowie die zwei Luftschiffe „Graf Zeppelin“ (LZ 127) und „Hindenburg“ (LZ 129). Sie sind bis heute die größten, die jemals gebaut wurden (Volumen 200 000 m<sup>3</sup>) (Mandel 2003).

Der Zeppelin „Deutschland“ (LZ 7 der DELAG) war weltweit das erste Passagierluftschiff. Es war gleichzeitig das erste Luftfahrzeug, welches fahrplanmäßig verschiedene Städte in Deutschland anflug (1910). Auf Betreiben der Nationalsozialistischen Regierung wurde 1935 die Deutsche Zeppelin Reederei (DZR) als Verkehrsbetrieb gegründet (Sitz in Frankfurt). Von dort wurde der Nord- und Südamerikadienst mit LZ 127 und LZ 129 abgewickelt (Mandel 2003).

Die größte Flugleistung erreichte das Luftschiff „Graf Zeppelin“ (LZ 127), das seinen Erstflug 1928 hatte, mit einer im Jahr 1929 durchgeführten Weltumrundung. Ab 1931 wurde dieses Luftschiff für den fahrplanmäßigen Linienverkehr nach Südamerika eingesetzt. Die erste Ära der kommerziellen Personenbeförderung mit Luftschiffen endete am 6. Mai 1937 mit einer Katastrophe; in Lakehurst (USA) fing der Zeppelin „Hindenburg“ (LZ 129) aus bis heute unbekannter Ursache bei der Landung Feuer und explodierte. Das endgültige Aus der großen Zeppeline kam 1940. Die Luftschiffe auf dem Flug- und Luftschiffhafen Frankfurt/Main wurden auf Anweisung der Nationalsozialisten abgewrackt. Die zwei Hallen ließ das Reichsluftfahrtministerium sprengen (Mandel 2003).

Anfang des letzten Jahrhunderts standen aber auch praktisch nutzbare Prallluftschiffe (in Deutschland Haupthersteller Parseval) zur Verfügung, die aber immer im Schatten der Zeppeline standen. So wurden in Großbritannien während des 1. Weltkrieges (1914 bis 1918) kleine Prallluftschiffe zur Küstenüberwachung und U-Boot-Suche eingesetzt. Im 2. Weltkrieg wurde der Typ des Prallluftschiffes von amerikanischen Firmen (vor allem Goodyear) deutlich weiterentwickelt. Die US Navy setzte Prallluftschiffe zur Konvoi-Begleitung, U-Boot-Suche und Küstenüberwachung ein. Nach Ende des 2. Weltkrieges erhielten diese Luftschiffe zusätzlich eine Rolle im amerikanischen Frühwarnsystem. Mit Suchradar, Sonar und optischen Aufklärungsmitteln ausgestattet, erfüllten diese Luftschiffe ihre Rolle gut und zuverlässig. Die US Navy erlangte durch diese Einsätze belastbare Betriebserfahrungen mit Luftschiffen kleiner und mittlerer Größe, auch im Allwetter-Betrieb in Eis und Schnee. Als Nebenprodukt entstanden neben den Navy-Luftschiffen bei der Firma Goodyear für den Eigenbedarf kleine Werbe-Luftschiffe, die für die Reifen aus diesem Hause jahrzehnte-

lang Werbung in den USA flogen. Als Betreiber übernahm Goodyear viele Verfahren der US Navy und adaptierte sie für den zivilen Flugbetrieb. Nahezu alle heute üblichen zivilen Betriebsverfahren basieren auf den von Goodyear bzw. der US Navy entwickelten Verfahren (Zeppelin 2003).

Die im zweiten Weltkrieg von der US Navy betriebenen Prallluftschiffe wurden auch nach 1945 weiter eingesetzt. In dieser Zeit wurden Luftschiffe des Typs ZPG-2 (Goodyear) gebaut, womit in den 1950er-Jahren ein 260-Stunden-Nonstop-Flug (15 000 km) ohne nachzutanken demonstriert wurde. Das größte jemals gebaute Prallluftschiff (ZPG-3) hatte eine Länge von ca. 120 m, ein Hüllenvolumen von ca. 43 000 m<sup>3</sup> und erreichte Höchstgeschwindigkeiten von 128 km/h. Trotz vergleichsweise hohem Automatisierungsgrad (z. B. bei Bodeneinrichtungen) beendete die US Navy 1962 ihren Luftschiffbetrieb (Mandel 2003, Zeppelin 2003).

Nach dem Ende des zweiten Weltkrieges schien „die Zeit der Luftschiffe“ vorüber zu sein. Entsprechend der Devise: „höher, schneller, weiter“ dominierten Flächenflugzeuge den allgemeinen Flugverkehr.

Einzelne technologische Entwicklungen wie die Einführung des Schwenkpropellers an Luftschiffen (Airship Industries Ltd.) führten zu Prallluftschiffen, die bis heute in Betrieb sind. Für deren Landevorgang ist jedoch eine relativ große Bodenmannschaft (bis zu 15 Personen) notwendig. In Deutschland wurde 1993 die Zeppelin Luftschifftechnik GmbH gegründet. Beim Zeppelin NT wurde die Schwenkpropeller-Technologie konsequent weiterentwickelt. Auch der Bodenbetrieb konnte weitgehend automatisiert werden. Insgesamt wurde die Einsatzfähigkeit von Luftschiffen deutlich verbessert.

Alle heute produzierten Luftschiffe, außer den Zeppelinen der Baureihe LZ N-07, sind Prallluftschiffe. Sie haben Hüllenvolumina zwischen 1 600 m<sup>3</sup> und 7 200 m<sup>3</sup> (Zeppelin 2003, S. 8). In Deutschland werden zudem Heißluft-Luftschiffe von der Gefa-Flug GmbH (Aachen) gebaut.

Die Idee, unbemannte mit Traggas gefüllte Plattformen in der Stratosphäre zu stationieren, wird bereits seit mehreren Jahrzehnten verfolgt. Ausgangspunkt waren zahlreiche Aktivitäten mit Stratosphärenballonen. Nach dem zweiten Weltkrieg wurden derartige Programme insbesondere in den USA verstärkt finanziert. Ballons werden nach wie vor für wissenschaftliche und für Wettermissionen in verschiedenen Ländern eingesetzt. Einsätze im militärischen Bereich wurden schwerpunktmäßig in den USA betrieben und finanziert.

Ende der sechziger Jahre wurden in den USA erste Programme für hochfliegende Luftschiffe sowohl bei der NASA als auch in der Industrie (z. B. Raven Industries) unter Nutzung der Höhenballonerfahrung gestartet. Die Mehrzahl der Programme endete in der Studienphase, da häufig die Folgefinanzierung fehlte. Ein erstes antriebsfähiges Kleinluftschiff „High Platform II“ (Nutzlast 2,5 kg) flog 1969 in ca. 12.000 m Höhe zwei Stunden lang mit Solarzellen und einem Elektromotor betrieben. Das

nächste realisierte Demonstratorprogramm war das „Sounder“-Programm. Das Luftschiff war für eine Höhe von ca. 13 000 m bei einer Nutzlast von 10 kg ausgelegt. Ein im Heck befindlicher Propeller wurde mit Hilfe von Solarzellen, Batterien und einem Elektromotor angetrieben. Beim ersten Versuch wurde zwar die vorgesehene Prallhöhe erreicht, beim Abstieg wurde auf Grund zu hoher Belastung das Leitwerk beschädigt. Beim zweiten Versuch hielt die Hülle nicht, beim dritten Versuch klappte das Druckmanagement in großer Höhe nicht. Diese Misserfolge führten zum Abbruch weiterer Demonstrator-Entwicklungen. Erst Mitte der neunziger Jahre starteten erneut Untersuchungen zu Höhenluftschiffen auf Grund eines sich abzeichnenden Marktes für Kommunikationsplattformen. Steigende Datenübertragungsraten, neue Technologien (UMTS) und immer geringer werdende Halbwertzeiten von Entwicklungen im Übertragungsbereich führten zur Suche nach preiswerten Alternativen zu Satelliten mit der zusätzlichen Möglichkeit einer Rückkehr und Wiederverwendung (Zeppelin 2003).

## 2. Ausgewählte neuere Projekte

Der heutige Stand der Technik bei Luftschiffen basiert auf den universitären und industriellen Projekten der letzten sechzig Jahre. Diese waren nach Einstellung der Großluftschiffaktivitäten in Deutschland zu Beginn des zweiten Weltkrieges und in Amerika Anfang der sechziger Jahre durch geringes Interesse und lediglich durch Kleinluftschiffprojekte geprägt. Der technologische Standard hat sich entsprechend gegenüber dem unmittelbaren Nachkriegsstand nicht wesentlich verbessert. Erst in den neunziger Jahren wurde die Luftschiffthematik wieder von einigen Universitäten und wenigen Firmen in USA, England und Deutschland im Rahmen nationaler Projekte (Lightship, Skyship, CargoLifter, Zeppelin NT) aufge-

griffen. Weltweit existieren zurzeit nur etwa 40 Kleinluftschiffe, die von wenigen Herstellern produziert werden und sich zum Teil noch im Prototypenstadium befinden.

Das bisher Gesagte gilt jedoch ausschließlich für Kleinluftschiffe. Für größere Luftschiffe gibt es seit den sechziger Jahren des vergangenen Jahrhunderts keine Einsatz erfahrung mehr und damit auch keine Anwendungserfahrung bei neueren Technologien. Die Problembereiche, die von verschiedenen Personen und Firmen gefordert und propagierten, aber bisher nicht realisierten Großluftschiffe sind in den tragenden Elementen (Hülle, Struktur), dem Heliummanagement, den Antriebssystemen und vor allem auch im „Ground Handling“ zu erwarten. Für eine Cargoanwendung gibt es darüber hinaus weder ein im Versuch bestätigtes Beladesystem noch ausreichende theoretische oder Simulationsuntersuchungen zu Aerodynamik, Flugmechanik, Lasten, Flugleistungen, etc. (Zeppelin 2003).

Im Folgenden sollen ausgewählte Luftschiffprojekte kurz dargestellt werden:

### SkyCat

Der SkyCat ist eine Entwicklung aus Großbritannien, die von der Fa. ATG – ursprünglich in Konkurrenz zum CargoLifter – konzipiert wurde. Die SkyCat-Luftschiffe sollen für den Transport schwerer Güter und für den Personentransport eingesetzt werden. Beim SkyCat handelt es sich um ein Hybridkonzept (Kombination aus Flugzeug, Senkrechtstarter und Luftschiff). Der Auftriebskörper hat die Form eines Doppelrumpfes mit aerodynamischer Formgebung, dieser trägt mit 40 Prozent aerodynamischem Auftrieb zur Auftriebsbilanz bei. Geringere Größe und ein Eigengewicht am Boden sind die Vorteile, ein Schwebezustand für ein punktgenaues Absetzen kann damit allerdings nicht erreicht werden (Zeppelin 2003). Ein 17 m großes Modell hat bisher zumindest die aerodynamische und flugmechanische Machbarkeit demonstriert.

Abbildung 12

### Hybridluftschiff „SkyCat“ (Fa. ATG)



Das geplante Gesamtprogramm von ATG ist modular aufgebaut. Die kleinste Version – das SkyCat 20 – soll eine Nutzlast von 20 Tonnen besitzen. Als weitere Produkte eines Familienkonzeptes sind Luftschiffe mit Zuladungen von 50, 200 und 1 000 Tonnen vorgesehen (Luftschiffvolumina 32 000, 475 000 und 2 000 000 m<sup>3</sup> bei 81, 185 und 307 m Luftschifflänge). Um von Flughäfen unabhängig zu werden, sind „Fahrwerke“ nach dem Luftkissenprinzip vorgesehen. Momentan gibt es ambitionierte Zeit- und Kostenschätzungen für die Umsetzung dieser Pläne, wobei eine Weiterführung des Programms von Investoren oder Auftraggebern abhängt, die bisher nicht gefunden wurden.

**CargoLifter**

Hier geht es um Aktivitäten, die seit 1996 in Deutschland betrieben wurden. Ziel war der Bau eines großen Luftschiffes, das übergroße und überschwere Lasten über Land und nach Übersee transportieren sollte. Der CargoLifter war als Kiel-Luftschiff konzipiert. Im Zusammenhang mit der Entwicklung des CargoLifters wurde eine ganze Reihe von Forschungsaktivitäten initiiert, die letztendlich zur Konstruktion und zum Bau des Luftschiffes führen sollten (z. B. Entwicklung eines Simulationstools zur Lastermittlung; Untersuchungen zur Flugmechanik mit dynamisch ähnlichen Modell-Luftschiffen, zur Aerostatik großer Luftschiffe, zur Aeroelastik weicher Luftschiffrümpfe, zu Hüllenmaterialien und zu Strukturbauteilen). Als Produktionsstandort für den konzipierten CargoLifter wurde der ehemalige Militärflughafen in Brand (Landkreis Dahme-Spreewald) vorgesehen.

Das CargoLifter-Luftschiff wurde projektiert, aber nicht gebaut. Die Gründe für das Scheitern des Projektes sind vielfältig. Genannt werden u. a. extrem optimistisch kalkulierte Entwicklungszeiten und Finanzierung. Zudem

war die Projektstruktur nicht adäquat ausgelegt (Mandel 2003). Die CargoLifter AG ging im Jahre 2002 in Insolvenz. Dadurch wurde ein Großteil der Forschungsergebnisse weder vollständig ausgewertet noch ausreichend dokumentiert (Zeppelin 2003).

**DELCON**

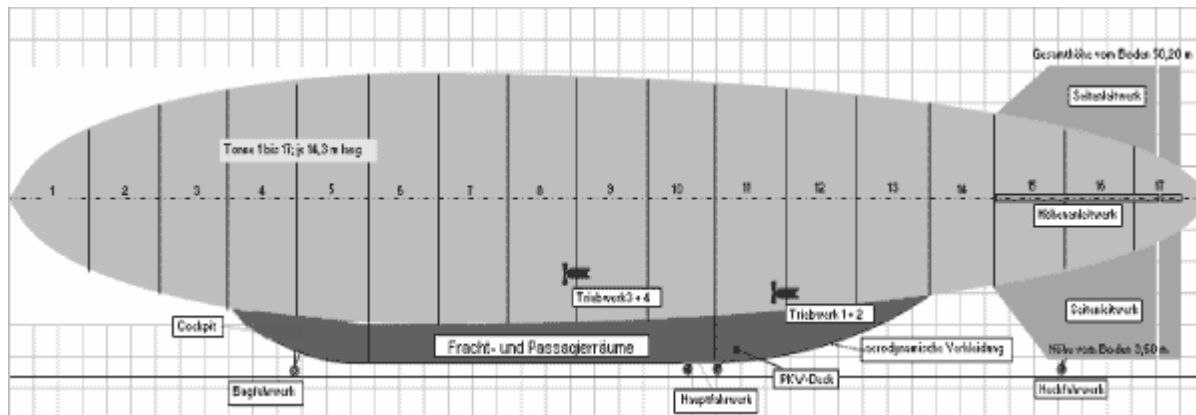
Die Fa. DELCON (Deutsche Luftfahrt Consult GmbH i.G., Wildau) wurde 2004 gegründet. Sie hat sich zum Ziel gesetzt, ein Großluftschiff „HGZ 129 M“ zu bauen (etwa „mit den Maßen der alten Hindenburg“), also ein starres Luftschiff. Der Luftschiffkörper ist in 17 so genannte einzelne „Tonnen“ aufgeteilt (s. Abb. 13). Das Gerüst selbst soll aus Kompositmaterialien bestehen, die mit Schaumstoff ausgesteift werden. Der sich dadurch bildende Außenring soll mit Helium gefüllt werden, so dass das eigentliche Traggas Wasserstoff in den einzelnen Tonnen durch diesen Heliummantel umgeben ist. Auf Grund verbesserter Oberflächenmaterialien und leistungsstarker Flugzeug-Triebwerke wird eine Geschwindigkeit von bis zu 200 km/h als erreichbar angegeben. Das Projekt befindet sich noch in der Projektierungsphase.

**Zeppelin Europe Tours**

Zeppelin Europe Tours (ZET) ist ein Projekt des Fördervereins Zeppelin Tourismus (Friedrichshafen). Das Geschäftsmodell sieht ein breites touristisches Angebot mit 12 Luftschiffen gestaffelt nach Stadtrund-, Einzelstrecken- als auch Rundflügen zwischen verschiedenen europäischen Städten (u. a. Paris, London, Brüssel) sowie in Deutschland Berlin, Hamburg, Dresden, Friedrichshafen vor. Die vorgesehene Luftschiff-Flotte soll aus – auf der Basis des Zeppelin NT weiterentwickelten – 40-sitzigen Luftschiffen bestehen.

Abbildung 13

**Konzept der HGZ 129 M**



Quelle: DELCON 2004

Abbildung 14

### Zeppelin Europe Tours (ZET)



Quelle: Zeppelin Europe Tours 2004

Der maximale Mittelbedarf für dieses Projekt wird auf etwa 400 Millionen Euro geschätzt (inklusive Entwicklungskosten). Investoren werden derzeit noch gesucht. Die Finanzierung ist langfristig angelegt. Bei entsprechender Auslastung wird die Gewinnschwelle im 14. Jahr des Projektes (nach Start) erreicht sein. Sofern ZET erfolgreich ist, wäre ein Ausbau von Franchisebetrieben weltweit möglich (Südafrika, Australien, Amerika).

### WALRUS

Das so genannte „Walrus-Projekt“ der US-amerikanischen DARPA (Defense Advanced Research Projects Agency) soll das größte Luftschiff aller Zeiten werden. Es soll 500 Tonnen Fracht (etwa eine militärische Einheit inklusive Gerät) über eine Strecke von mehr als zehntausend Kilometern transportieren können. Eingesetzt werden soll eine neue Hybrid-Technik, welche die Auftriebs-eigenschaften eines Flugzeuges mit denen eines Luftschiffs kombiniert (DARPA 2004).

### Stratosphären-Plattformen

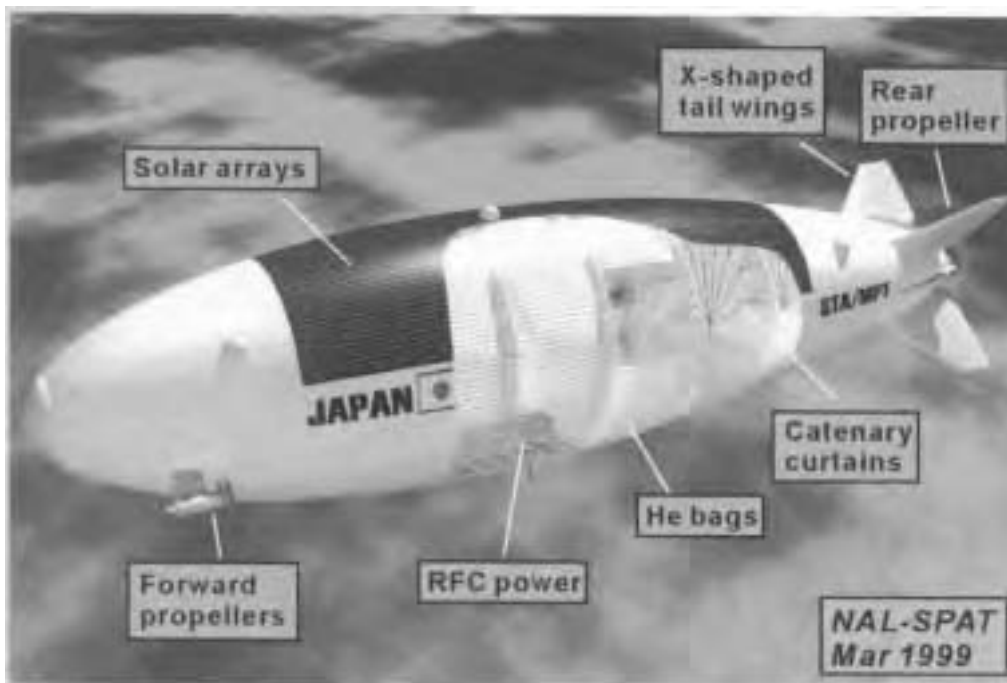
Das Programm „High Altitude Airship“ (HAA) der USA wird von der Missile Defence Agency getragen. In diesem Programm sollen Stratosphären-Luftschiffe (Länge etwa 150 Meter, mögliche Flughöhe 20 Kilometer) für Überwachungsaufgaben entwickelt werden, die sich etwa ein Jahr in der Luft halten können (Lockheed Martin 2004). Die bei Lockheed Martin in Auftrag gegebene

Phase 2 in Höhe von 40 Mio. Dollar soll Mitte 2004 beendet sein. Für die Entwicklung eines Prototypen in der Phase 3 bis 2006 sind 50 Millionen Dollar veranschlagt. Danach ist eine Bewertungsphase von 2006 bis 2008 für die potenziellen Nutzer mit einem Budget von 9 Mio. Dollar vorgesehen (Zeppelin 2003). Im Erfolgsfall sollen dann die Luftschiffe in Serie entwickelt und gebaut werden.

Seit 1998 betreibt Japan ein Programm zur Entwicklung von Stratosphären-Plattformen. Nachdem erste Untersuchungen die grundsätzliche Machbarkeit nachgewiesen haben, wurde ein komplexes Forschungsprogramm für die wichtigsten technologischen Komponenten aufgestellt. In einer ersten Programmphase, die 2004 endet und für die 130 Mio. Euro bereitgestellt wurden, wurden wesentliche risikobehaftete Technologien bis hin zum Demonstrator-Stadium entwickelt. Praktische Luftschiffauslegungs- und Betriebserfahrung wurden mit einem neu entwickelten ferngesteuerten und solargetriebenen kleinen Prallluftschiff der 40 m-Klasse in Einsatzhöhen bis zu 5 000 m gesammelt. Ein erster Höhendemonstrator ähnlicher Größenordnung wurde im Sommer 2003 in eine Höhe von 16 000 m gebracht. Das Demonstrationsprogramm für ein Luftschiff mit ca. 150 m Länge soll 2005 begonnen werden. Es ist ein Budget zwischen 140 und 270 Mio. Euro (je nach Umsetzungskonzept) vorgesehen. Dieses Programm soll den Einsatz von Serienluftschiffen ab 2010 vorbereiten.

Abbildung 15

Das japanische Stratosphären-Luftschiff



Quelle: Zeppelin 2003, S. 125



	Seite
<b>3. Tabellenverzeichnis</b>	
Tabelle 1: Vergleich der Rundflug-Preise zwischen Luftschiff und Konkurrenzsystemen .....	26
Tabelle 2: Überblick über mögliche Aufgaben für Luftschiffe als Missionsplattform .....	27
Tabelle 3: Mögliche Synergieeffekte .....	33
<b>4. Abbildungsverzeichnis</b>	
Abbildung 1: Aufstieg mit konstanter Tragkraft .....	8
Abbildung 2: Vertikale und horizontale Kräfte beim Luftschiff .....	9
Abbildung 3: Luftdichte in Abhängigkeit der Höhe, Klimazone und Wetterlage .....	10
Abbildung 4: Aerostat (TCOM-32-M) mobil auf einem Schiff stationiert	12
Abbildung 5: Funktionsprinzip eines Prallluftschiffes .....	12
Abbildung 6: Ein Entwurfsbild des Kiel-Luftschiffes CargoLifter .....	14
Abbildung 7: Tragstruktur eines halbstarren Luftschiffs (Zeppelin LZ N07)	14
Abbildung 8: Stratosphären-Luftschiff-Konzept der Universität Stuttgart	15
Abbildung 9: Darstellung der Zugfestigkeit des Hüllenmaterials in Relation zum Hüllengewicht für niedrig fliegende Luftschiffe und Stratosphären-Plattformen .....	18
Abbildung 10: Einsatzkonzept Stratosphären-Plattform für Telekommunikation .....	30
Abbildung 11: Einsatzszenarien von Stratosphären-Plattformen für Überwachungsaufgaben der USA .....	31
Abbildung 12: Hybridluftschiff „SkyCat“ (Fa. ATG) .....	37
Abbildung 13: Konzept der HGZ 129 M .....	38
Abbildung 14: Zeppelin Europe Tours (ZET) .....	39
Abbildung 15: Das japanische Stratosphären-Luftschiff .....	40





