

Universität Hamburg  
Department Geowissenschaften  
Institut für Geographie  
Arbeitsbereich Wirtschaftsgeographie

**„Ansätze zur Reduzierung der Klimawirksamkeit der globalen Zivilluftfahrt“**

Diplomarbeit  
zur Erlangung des akademischen Grades des  
„Diplom Geographen“  
Externe Version

Verfasst von:  
Janpeter Schilling  
Sedanstr. 21 a  
20146 Hamburg  
Janpeter.Schilling@yahoo.com  
Matrikel-Nr.: 5517110

Erstgutachter:  
Prof. Dr. Jürgen Oßenbrügge  
  
Zweitgutachterin:  
Prof. Dr. Bärbel Leupolt

## **Erklärung zur Anfertigung dieser Arbeit**

Hiermit erkläre ich, dass die vorliegende Arbeit ohne fremde Hilfe, selbständig und lediglich unter Benutzung der aufgeführten Hilfsmittel angefertigt wurde.

Hamburg, im Dezember 2008

## **Abstract**

The global air traffic showed a strong growth over the past decades. By the year 2025 the amount of passengers and freight is expected to double and triple respectively. In the context of this development, measures to reduce the climate effect of aviation gain relevance. This thesis gives an overview of the most important measures on a technical, operational and strategical as well as on an infrastructural and political level. While focusing on the infrastructural reorganisation of the European Airspace under the 'Single European Sky', interdependencies between political and functional spaces are identified. Based on this the thesis assesses if the currently chosen measures are sufficient to effectively reduce the climate impact of aviation in the short (up to 2020), mid (2020 to 2030) and long (2030 and beyond) term. Furthermore, measures are discussed that are possible and recommendable beyond the ones currently chosen using a set of scenarios created for this purpose. In order to grasp the entire complexity of the subject, current studies were utilised, international conferences were visited and experts – particularly from Deutsche Lufthansa – were interviewed to every aspect mentioned.

## **Zusammenfassung**

Der globale Luftverkehr ist in den vergangenen Jahrzehnten stark gewachsen. Bis 2025 wird eine Verdoppelung bzw. Verdreifachung des Passagier- und Frachtaufkommens erwartet. Im Zuge dieser Entwicklung gewinnen Ansätze zur Reduzierung der Klimawirksamkeit der Luftfahrt zunehmend an Bedeutung. Die vorliegende Arbeit gibt einen Überblick über die wichtigsten Ansätze auf technischer, operationeller und strategischer sowie auf infrastruktureller und politischer Ebene. Der Schwerpunkt der Betrachtung liegt dabei auf der infrastrukturellen Neuordnung des europäischen Luftraums unter dem „Single European Sky“, innerhalb derer Interdependenzen zwischen politischen und funktionalen Räumen aufgezeigt werden. Darauf aufbauend wird eingeschätzt, ob die derzeit verfolgten Ansätze ausreichend sind, um die Klimawirksamkeit des Luftverkehrs kurz- (bis 2020), mittel- (2020 bis 2030) und langfristig (über 2030 hinaus) effektiv zu begrenzen. Unter Anwendung hierzu entwickelter Szenarien werden Ansätze diskutiert, die über die derzeit verfolgten hinaus denkbar und empfehlenswert sind. Um die Vielschichtigkeit der gesamten Thematik zu erfassen, wurden aktuelle Studien ausgewertet, internationale Konferenzen besucht sowie zu jedem genannten Teilaspekt Expertengespräche – insbesondere mit der Deutschen Lufthansa – geführt.

# Inhaltsverzeichnis

<b>Erklärung zur Anfertigung dieser Arbeit .....</b>	<b>2</b>
<b>Abstract .....</b>	<b>3</b>
<b>Zusammenfassung .....</b>	<b>3</b>
<b>Inhaltsverzeichnis .....</b>	<b>4</b>
<b>Abbildungs- und Kartenverzeichnis .....</b>	<b>6</b>
<b>Tabellenverzeichnis .....</b>	<b>7</b>
<b>Abkürzungsverzeichnis .....</b>	<b>7</b>
<b>1. Einleitung.....</b>	<b>12</b>
1.1. Zielsetzung und Einordnung in den wissenschaftlichen Kontext .....	13
1.2. Begriffsklärung und Themenabgrenzung .....	14
1.3. Aufbau der Arbeit und methodisches Vorgehen.....	15
<b>2. Klimawirksamkeit der globalen Zivilluftfahrt .....</b>	<b>17</b>
<b>2.1. Globale Zivilluftfahrt .....</b>	<b>17</b>
2.1.1. Charakterisierung der Luftfahrt heute .....	18
2.1.2. Entwicklungsprognosen für die Luftfahrt.....	20
2.1.3. Verbrennungsprodukte der Luftfahrt.....	21
<b>2.2. Klimawirksamkeit der Luftfahrt.....</b>	<b>24</b>
2.2.1. Direkte Wirkung der Emissionen .....	25
2.2.2. Indirekte Wirkung durch Wolkenbildung .....	27
2.2.3. Gesamtklimawirksamkeit.....	29
<b>2.3. Zwischenfazit.....</b>	<b>32</b>
<b>3. Szenarienperspektive .....</b>	<b>33</b>
3.1. Upper Bound Szenario .....	35
3.2. Lower Bound Szenario .....	39
<b>4. Ansätze zur Reduzierung der Klimawirksamkeit der globalen     Zivilluftfahrt .....</b>	<b>41</b>
<b>4.1. Technische Ansätze.....</b>	<b>42</b>
4.1.1. Innovative Triebwerkskonzepte .....	43
4.1.2. Alternative Treibstoffe.....	52
4.1.3. Innovative Flugzeugstrukturen und Konzepte .....	65

<b>4.2. Operative und Strategische Ansätze .....</b>	<b>75</b>
4.2.1. Innovative Triebwerkswäsche .....	76
4.2.2. Globale Flottenentwicklung .....	79
4.2.3. Visionäre Operationskonzepte .....	85
<b>4.3. Infrastrukturelle Neuordnung des europäischen Luftraums durch den     „Single European Sky“ .....</b>	<b>90</b>
4.3.1. Strukturelle Ineffizienz des europäischen Luftraums .....	90
4.3.2. Lösungsansatz Single European Sky .....	96
4.3.3. Kritische Betrachtung des Single European Sky .....	109
<b>4.4. Politische Instrumente.....</b>	<b>117</b>
4.4.1. Finanzpolitische Instrumente.....	117
4.4.2. Administrative Instrumente .....	126
4.4.3. Ordnungspolitische Instrumente.....	128
<b>4.5. Zwischenfazit.....</b>	<b>135</b>
<b>5. Gesamtfazit und Ausblick .....</b>	<b>139</b>
<b>Literatur .....</b>	<b>143</b>
<b>Internet- und elektronische Quellen .....</b>	<b>155</b>
<b>Anhang A: Staaten des Eurocontrolgebiets.....</b>	<b>175</b>
<b>Anhang B: Übersicht der interviewten Experten .....</b>	<b>176</b>

## Abbildungs- und Kartenverzeichnis

Abb. 2.1.:	Entwicklung des weltweiten Passagieraufkommens von 2000 bis 2005 und Prognose für 2025. ....	19
Abb. 2.2.:	Weltweites Frachtaufkommen 2000, 2005 und Prognose bis 2025. ..	19
Abb. 2.3.:	Durchschnittliche Verbrennungsprodukte eines Verkehrsflugzeugs. .	22
Abb. 2.4.:	Entwicklung und Prognose des Kerosinverbrauchs der globalen Luftfahrt (zivil und militärisch). ....	22
Abb. 2.5.:	Entwicklung der Transportleistung und der Emissionen der Lufthansa Konzernflotte zwischen 1991 und 2007. ....	23
Abb. 2.6.:	Globale und vertikale Verteilung der luftverkehrsbedingten Emissionen dargestellt am Beispiel der Stickoxidkonzentration. ....	24
Abb. 2.7.:	Der luftfahrtinduzierte Strahlungsantrieb und seine Komponenten. ....	27
Abb. 2.8.:	Kondensstreifen über dem Südosten der USA. ....	28
Abb. 3.1.:	Vereinfachte Darstellung des Upper Bound und Lower Bound Szenarios anhand des Druckverlauf und der wichtigsten Ereignisse. ....	36
Abb. 3.2.:	Globale Erderwärmung für verschiedene IPCC Szenarien. ....	37
Abb. 3.3.:	Entwicklung und Prognose der Kohlendioxidemissionen der globalen Luftfahrt. ....	38
Abb. 3.4.:	Entwicklung und Prognose des Luftverkehrbeitrags zum anthropogenen Gesamtstrahlungsantrieb. ....	40
Abb. 4.1.:	Schematischer Vergleich von Turbofan und Turbo-prop. ....	44
Abb. 4.2.:	Entwicklung und Prognose des spezifischen Treibstoffverbrauchs (SFC) und des Nebenstromverhältnisses (BPR) am Beispiel verschiedener Turbotriebwerksgenerationen. ....	46
Abb. 4.3.:	Schematische Darstellung des Getriebefans. ....	47
Abb. 4.4.:	Aufnahme des Propfans von 1988 und Simulation heute. ....	48
Abb. 4.5.:	Erwartete Entwicklung alternativer Flugzeugtreibstoffe weltweit. ....	63
Abb. 4.6.:	Typische und erwartete Materialzusammensetzung für kommerzielle Flugzeuge 2000 und 2020. ....	67
Abb. 4.7.:	Entwicklung der Materialzusammensetzung am Beispiel von drei Flugzeugtypen. ....	67
Abb. 4.8.:	Zusammensetzung, technologische Ansätze und Reduktionspotenziale des Widerstands eines Flugzeugs im Reiseflug. ....	68
Abb. 4.9.:	Modell eines Blended Wing Body Flugzeuges. ....	71
Abb. 4.10.:	Das Cyclean Engine Wash Verfahren bei der Anwendung. ....	77
Abb. 4.11.:	Erwartete Entwicklung der weltweiten Flugzeugflotte zwischen 2007 und 2027. ....	80
Abb. 4.12.:	Entwicklung und Prognose des durchschnittlichen Kraftstoffverbrauchs der globalen Passagierflugzeugflotte. ....	82

Abb. 4.13.:	Beispiel einer treibstoffsparenden Formation für Zivilflugzeuge unterschiedlicher Größe.....	88
Abb. 4.14.:	Schematische Darstellung der Emissionen, Reduktionsziele und Reduktionspotenziale im Eurocontrolgebiet.....	94
Abb. 4.15.:	Übersicht des SESAR Masterplans. ....	99
Abb. 4.16.:	Nötige Investitionen zur Erreichung der Leistungsstufe 3 nach Akteuren. ....	101
Abb. 4.17.:	Aktueller Stand und geplanter Verlauf der funktionalen Luftraumblock (FAB) Initiativen.....	104
Abb. 4.18.:	Instrumente der Luftverkehrspolitik.....	117
Karte 4.1.:	Struktur des europäischen Luftraums. ....	91

## Tabellenverzeichnis

Tab. 2.1.:	Charakteristika wichtiger anthropogener Treibhausgase.....	26
Tab. 3.1.:	Zusammenfassung des Upper Bound und Lower Bound Szenarios..	34
Tab. 4.1.:	Alternative Treibstoffe im Vergleich zu herkömmlichem Kerosin. ....	61
Tab. 4.2.:	Auswirkungen des Cyclean Engine Wash Verfahrens auf Treibstoffverbrauch und Kohlendioxidemission am Beispiel verschiedener Flugzeugtypen der Deutschen Lufthansa Flotte.....	78
Tab. 4.3.:	Zusammensetzung der weltweiten Passagierflotte 2007 und 2027...	81
Tab. 4.4.:	Der Luftraum Europas und der USA. ....	92
Tab. 4.5.:	Zusätzlicher, durchschnittlicher Zeit- und Kerosinverbrauch pro Flug im Eurocontrolgebiet.....	93
Tab. 4.6.:	Kosten- und Kohlendioxideinsparungspotenziale durch Eurocontrol Zielvorgaben. ....	95
Tab. 4.7.:	Zusammensetzung der betrieblichen Kosten der größten Fluggesellschaften nach Weltregion. ....	121

## Abkürzungsverzeichnis

ACARE	Advisory Council For Aeronautics Research in Europe
ACI	Airport Council International
ADV	Arbeitsgemeinschaft Deutscher Verkehrsflughäfen
AEA	Association of European Airlines

AEDT	Aviation Environmental Design Tool
AEM	Advanced Emission Model
AIC	Aviation Induced Cloudiness
AMAN	Arrival Manager
ANSP	Air Navigation Service Providers
ATA	Air Transport Association
ATAG	Airport Transport Action Group
ATM	Air Traffic Management
BARIG	Board of Airline Representatives in Germany
BMBF	Bundesministerium für Bildung und Forschung
BMJ	Bundesministerium der Justiz
BMU	Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit
BMVBS	Bundesministerium für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung
BP	British Patrol
BPD	Barrel Per Day
BtL	Biomass to Liquid
BUND	Bund für Umwelt und Naturschutz Deutschland
BWB	Blended Wing Body
CAA	Civil Administration Authority
CAEP	Committee on Aviation Environmental Protection
CANSO	Civil Air Navigation Service Organisation
CAREX	Cargo Rail Express
CDA	Continuous Descent Approach
CEAS	Council of European Aerospace Societies
CFK	Karbonfaserverstärkter Kunststoff
CH <sub>4</sub>	Methan
CLAIRE	Clean Air Engine
CO	Kohlenmonoxid
CO <sub>2</sub>	Kohlendioxid
CO <sub>2</sub> -Äq.	Kohlendioxid-Äquivalente
CORDIS	Community Research and Development Information Service
CRCO	Central Route Charges Office
CRISP	Counter Rotating Integrated Shrouded Propfan
CtL	Coal to Liquid



DAC	Double Annular Combustor
DFS	Deutsche Flugsicherung
DGLR	Deutsche Gesellschaft für Luft- und Raumfahrt
DLR	Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt
DMAN	Departure Manager
DREAM	Validation of Radical Engine Architecture Systems
EC	Europe Central (FAB)
EG	Europäische Gemeinschaft
EIA	Energy Information Administration
ESRI	Environmental Systems Research Institute
EU	Europäische Union
FAA	Federal Aviation Administration
FAB	Functional Airspace Block
FAZ	Frankfurter Allgemeine Zeitung
FOE	Friends of the Earth
g	Gramm
GEXSI	Global Exchange for Social Investment
GPS	Global Positioning System
GSAK	Greener Skies Ahead Konferenz
GtL	Gas to Liquid
HAW	Hochschule für Angewandte Wissenschaften Hamburg
H <sub>2</sub> O	Wasser
H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	Schwefelsäure
HLG	High Level Group
IACA	International Air Carrier Association
IATA	International Air Transport Association
ICAO	International Civil Aviation Organization
ICCEPT	Imperial College Centre for Energy Policy and Technology
IEA	International Energy Agency
IMF	International Monetary Fund
IPCC	Intergovernmental Panel on Climate Change
ITD	Integrated Technology Demonstrator
JAL	Japan Airlines
JTI	Joint Technology Initiative

kg	Kilogramm
KLM	Royal Dutch Airline
km	Kilometer
km <sup>2</sup>	Quadratkilometer
km/h	Kilometer pro Stunde
LBS	Lower Bound Szenario
m	Meter
m <sup>2</sup>	Quadratmeter
m <sup>3</sup>	Kubikmeter
MJ	Megajoule
MOF	Ministry of Finance Japan
MRJ	Mitsubishi Regional Jet
MRO	Maintenance, Repair, Overhaul
NACRE	New Aircraft Concept REsearch
NASA	National Aeronautics and Space Administration
NO <sub>2</sub>	Stickstoffdioxid
NO <sub>x</sub>	Sammelbezeichnung für verschiedene Stickstoffoxide
NOP	Network Operations Plan
NUAC	Northern Upper Area Control
OAG	Official Airline Guide
OECD	Organisation for Economic Co-operation and Development
OEM	Original Equipment Manufacturer
pax	Passagier
pkm	Passagier-Kilometer
ppm	parts per million
PRC	Performance Review Commission
PTC	Precision Trajectory Clearance
R&D	Research and Development
RPK	Revenue Passenger Kilometres
SAGE	System for Assessing Aviation's Global Emissions
SANE	Sustainable Aviation Network Europe
SARS	Severe Acute Respiratory Syndrome
SBAC	Society of British Aerospace Companies
SFC	Specific Fuel Consumption

SEE FABA	South East Europe Functional Airspace Block Approach
SES	Single European Sky
SESAR	Single European Sky Air Traffic Management Research
SFC	specific fuel consumption
SO <sub>2</sub>	Schwefeldioxid
SWIM	System Wide Information Management
SZ	Süddeutsche Zeitung
t	Tonne (metrisch)
T&E	European Federation for Transport and Environment
TAZ	Tageszeitung
TKT	Ton Kilometers Transported
TOW	Take-Off Weight
UBA	Umweltbundesamt
UBS	Upper Bound Szenario
UHC	Unverbrannte Kohlenwasserstoffe
UK-IR	Großbritannien und Irland (FAB)
UKW	Ultrakurzwelle
UNFCCC	United Nations Framework Convention on Climate Change
USA	Vereinigte Staaten von Amerika
USD	US Amerikanische Dollar
WWF	World Wide Fund for Nature
XWB	Extra Wide Body

# 1. Einleitung

“I have always considered global warming to be a matter of utmost urgency. [...] I now believe, more than ever before, that a global calamity [Katastrophe] awaits us if we do not act” warnt der Generalsekretär der Vereinten Nationen Ban Ki-moon (in United Nations 2007) und betont damit das Ausmaß des Klimawandels. Insbesondere in den vergangenen Jahren haben vor allem die Berichte des Weltklimarats IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change) dazu beigetragen, dass sowohl die Rolle des Menschen als zentraler Treibhausgas-Emittent als auch die weitreichenden sozialen, ökonomischen und ökologischen Folgen eines „dangerous climate change“ (Schellnhuber 2006:6), heute als weitgehend bekannt gelten (siehe IPCC 2007a, IPCC 2007b, Stern 2007). Um dessen dramatischen Folgen zu verhindern, ist es nach Auffassung des IPCCs notwendig, die globale Erderwärmung gegenüber dem vorindustriellen Niveau von 1900 auf zwei Grad Celsius zu begrenzen (IPCC 2007c:99). Das Kyoto-Protokoll sieht eine globale Treibhausgasreduktion von mindestens fünf Prozent bis 2012 gegenüber 1990 vor (United Nations 1998:3). Die Europäische Gemeinschaft hat sich eine Senkung der Treibhausgase um 20 Prozent bis 2020 gegenüber dem genannten Basisjahr als Ziel gesetzt (European Commission 2007a).

Parallel hat sich der Luftverkehr im Zuge der Globalisierung zum wichtigsten Verkehrsträger auf globaler Maßstabsebene entwickelt. Er generiert Wohlfahrt und ermöglicht eine bisher unerreichte Mobilität (siehe ATAG 2008a). Als zentrales Vehikel der Weltwirtschaft ist der Luftverkehr in der Vergangenheit stark gewachsen (vgl. Airbus 2007a:41 und ICAO 2007a:3). Mittel- bis langfristig werden weiterhin hohe jährliche Wachstumsraten von etwa fünf Prozent erwartet. Bis 2025 könnte sich so das Passagier- und Frachtaufkommen nahezu verdoppeln bzw. verdreifachen (ICAO 2007b:2).

Durch diese duale Entwicklung rücken Bestrebungen in den Vordergrund den bisher von Emissionsvorgaben befreiten „Klimakiller“ (Germanwatch 2005:4, Robin Wood 2005:1, Högelsberger 2007:2) Luftverkehr stärker in die Pflicht zu nehmen. Ansätze zur Reduzierung der Klimawirksamkeit der globalen Zivilluftfahrt gewinnen an Bedeutung. Die hier vorliegende Arbeit nimmt sich dieser Thematik an.

## 1.1. Zielsetzung und Einordnung in den wissenschaftlichen Kontext

Es wird der Versuch unternommen die wichtigsten Ansätze zur Reduzierung der Klimawirksamkeit der globalen Zivilluftfahrt übersichtlich darzustellen. Hierbei wird sowohl auf technische, operative und strategische Ansätze, als auch auf infrastrukturelle Aspekte und politische Instrumente eingegangen. Während der Raum bei der Betrachtung der Infrastruktur und der politischen Instrumente eine zentralere Rolle spielt, ist der geographische Bezug im Bereich der technischen sowie operativen bzw. strategischen Aspekte nicht unmittelbar gegeben. Ihre Behandlung ist dennoch unabdingbar, da ein Verständnis für die mit ihnen verbundenen Einsparungspotenziale die Grundlage für die Bearbeitung des vorliegenden Themas bildet. Bisher wurden in der Wissenschaft überwiegend Einzelaspekte der hier gewählten Thematik untersucht.<sup>1</sup> Die Absicht dieser Arbeit ist es hingegen einen Überblick über die relevanten Teilaspekte zu bieten, um Interdependenzen zwischen den einzelnen Wissenschaftsdisziplinen aufzuzeigen. Der Autor ist daher der Auffassung, dass die vorliegende Arbeit dem vernetzten Denken, der „Multiperspektivität“ (Gebhardt 2007:7) sowie der interdisziplinären Intention, als Kernaufgaben der Geographie, entspricht.

Aus dem formulierten Primärziel der Arbeit leiten sich zwei Sekundärfragestellungen ab. Die erste lautet:

Sind die derzeit verfolgten Ansätze ausreichend, um die Klimawirksamkeit der globalen Zivilluftfahrt kurz- (heute bis etwa 2020), mittel- (2020 bis 2030) und langfristig (2030 und darüber hinaus) effektiv zu begrenzen?

Unter einer effektiven Begrenzung ist eine weitgehende Stabilisierung des derzeitigen Emissionsniveaus (siehe 2.2.), trotz Zunahme des Flugverkehrsaufkommens, zu verstehen. In diesem Zusammenhang soll eingeschätzt werden, wie wahrscheinlich die Erreichung der vom Beirat für Aeronautische Forschung in Europa, kurz ACARE (Advisory Council For Aeronautics Research in Europe), formulierten Emissionsreduktionsziele für 2020 ist (siehe

---

<sup>1</sup> Beispielsweise konzentrieren sich Bows et al. (2009) auf die europäische Politik, Cook (2007) beschränkt sich auf das Verkehrsmanagement und Janić (2007) betrachtet vor allem die Nachhaltigkeit des Luftverkehrs. In seiner Komplexität wurde das Thema bisher ausschließlich in einem Sonderbericht des IPCCs (1999) behandelt.

Einleitung Kapitel vier). Des Weiteren stellt sich die Frage:

Welche Ansätze sind über die derzeit verfolgten hinaus möglich und empfehlenswert?

Um diese, sehr breit angelegten Fragestellungen in angemessener Form beantworten zu können, ist es nötig im Vorfeld eine klare Abgrenzung der Begriffe sowie des Themas vorzunehmen.

## **1.2. Begriffsklärung und Themenabgrenzung**

Diese Arbeit beschäftigt sich mit Ansätzen zur Reduzierung der Klimawirksamkeit der globalen Zivilluftfahrt. Die Klimawirksamkeit wird dabei als ein Kennzeichen für die Stärke der Klimabeeinflussung verstanden. Ihre zentrale Messgröße ist der Strahlungsantrieb (siehe hierzu ausführlich 2.2.3.). In Anlehnung an Mensen umfasst die Zivilluftfahrt „die Gesamtheit aller mit dem Luftverkehr in unmittelbarem und mittelbarem Zusammenhang stehender Vorgänge“ (2003:6) ohne Berücksichtigung der privaten, militärischen und humanitären Komponente. Die Begriffe „Luftfahrt“ und „Luftverkehr“ weisen daher einen hohen Deckungsgrad auf. Der Luftverkehr ist in der vorliegenden Untersuchung mit dem Linienluftverkehr gleichzusetzen. Konform mit dem „Abkommen von Chicago“ ist der Linienluftverkehr als „any scheduled air service performed by aircraft for the public transport of passengers, mail or cargo“ (ICAO 2006a:43) zu sehen. Sollten sich Textpassagen dieser Arbeit auf nicht-öffentliche Komponenten (siehe oben) beziehen, wird darauf explizit hingewiesen. Die übrigen Begriffe der Arbeit werden nach Notwendigkeit im Rahmen ihrer erstmaligen Verwendung definiert.

Der vorgegebene Rahmen sowie der weite thematische Horizont der vorliegenden Arbeit machen eine starke Akzentuierung erforderlich. Daher wird an die Darstellung der Ansätze zur Reduzierung der Klimawirksamkeit der globalen Zivilluftfahrt kein Anspruch auf Vollständigkeit gestellt. Es werden vielmehr die wichtigsten Ansätze der jeweiligen Disziplinen aufgegriffen. Im Bereich der technischen Entwicklung bedeutet dies eine Fokussierung auf die Effizienzsteigerungspotenziale bestehender Technologien und zu erwartender Meilensteine. Während die ausgewählten technischen, operationellen und strategischen Ansätze regionsunspezifisch

betrachtet werden, wird für die Bewertung der Infrastruktur und der politischen Instrumente eine geographische Begrenzung auf Europa vorgenommen.

Als einer der wichtigsten und dichtesten Flugräume der Welt befindet sich der europäische Luftraum im Rahmen des Projekts „Single European Sky“ in einem massiven Strukturwandel. Um diesen angemessen betrachten zu können, wird auf die Untersuchung der Bodeninfrastruktur gänzlich verzichtet. Ebenso konzentriert sich die Diskussion der politischen Ansätze im Wesentlichen auf Europa. Vereinzelt wird diese Maßstabsebene verlassen, um Beispiele auf nationalstaatlicher Ebene anzuführen oder um die Auswirkungen europäischer Entwicklungen auf weitere Weltregionen (insbesondere Nordamerika) aufzuzeigen. Letzteres ist insbesondere bei der Diskussion um den geplanten Luftverkehrmissionshandel ab 2012 notwendig.

Freiwillige Kompensationsmaßnahmen durch einzelne Wirtschaftssubjekte werden in dieser Arbeit vollständig ausgeklammert, da sie nicht zu einer direkten Reduzierung der Klimawirksamkeit führen.<sup>2</sup> Im Vordergrund stehen dagegen die zentralen Akteure aus Politik und Luftfahrt (vornehmlich Fluggesellschaften und Hersteller sowie thematisch begrenzt Flugverkehrsdienstleister). Die Rolle und Perspektive der Fluggesellschaften findet hierbei eine besondere Berücksichtigung. Die Bewertung von Ansätzen, Auswirkungen und Entwicklungen wird dazu in Teilen um die Perspektive der Deutschen Lufthansa AG, als zweitgrößte europäische Fluggesellschaft, ergänzt.<sup>3</sup> Hiervon verspricht sich der Autor eine Erweiterung der Perspektivenbasis.

### **1.3. Aufbau der Arbeit und methodisches Vorgehen**

Die Arbeit ist neben dieser Einleitung in weitere vier Kapitel gegliedert. Zunächst beschreibt Kapitel zwei die Klimawirksamkeit der globalen Zivilluftfahrt, mit dem Ziel den thematischen Hintergrund sowie die Relevanz der weiteren Analyse aufzuzeigen. Im Anschluss wird in Kapitel drei eine Szenarienperspektive entworfen, welche beabsichtigt die Untersuchungsgrundlage für das darauf folgende Kapitel zu

---

<sup>2</sup> Zu den freiwilligen Kompensationsmaßnahmen siehe unter anderen Atmosfair (2008) und Myclimate (2008).

<sup>3</sup> Es sollte darauf hingewiesen werden, dass sich die vorliegende Arbeit nicht ausschließlich und im Detail mit den von der Deutschen Lufthansa gewählten Ansätzen zur Reduzierung der Klimawirksamkeit beschäftigt. Diese werden vom Unternehmen selbst in zahlreichen Dokumenten ausführlich dargestellt (siehe Deutsche Lufthansa 2002, 2007a, 2008a, 2008c).

erweitern. Kapitel vier bildet den Kern der Arbeit. Innerhalb dessen werden Ansätze beschrieben und diskutiert, die derzeit im Hinblick auf eine Reduzierung der Klimawirksamkeit der globalen Zivilluffahrt verfolgt werden. Interdependenzen zwischen einzelnen Teilbereichen werden aufgezeigt. Zudem wird unter Berücksichtigung der Szenarienperspektive untersucht, welche Ansätze über die bisher verfolgten hinaus möglich und empfehlenswert sind. Das letzte Kapitel beantwortet die unter 1.1. formulierten Leitfragen, führt die wesentlichen Erkenntnisse zu einem Gesamtfazit zusammen und gewährt einen kurzen Ausblick.

Um den skizzierten Aufbau angemessen realisieren zu können, wurde folgendermaßen vorgegangen. Zunächst wurden zahlreiche Fachpublikationen jüngsten Datums ausgewertet. Die Auswertung wurde im Anschluss um eine umfangreiche Internetrecherche ergänzt. Durch den regen Austausch mit zentralen Forschungseinrichtungen (unter anderen dem Deutschen Zentrum für Luft- und Raumfahrt (DLR), der Hochschule für Angewandte Wissenschaften Hamburg (HAW), dem Fraunhofer Institut und Eurocontrol) konnte nicht nur der fachliche Blick geschärft werden, sondern auch der Kreis der verfügbaren Studien und Beiträge erheblich vergrößert werden. Letzteres trifft ebenso für den Kontakt mit den Unternehmen Deutsche Lufthansa AG, Lufthansa Technik AG, Airbus sowie Sullivan & Frost zu. Die zur Verfügung gestellten Studien und Unternehmensdaten ermöglichten eine praxisnahe Betrachtung der verschiedenen Thematiken.

Mit dem Ziel die aktuelle Entwicklung des wissenschaftlichen Diskurs zu verfolgen, wurden zwei internationale Konferenzen persönlich besucht (Greener Sky Ahead in Berlin und Sustainable Aviation Network Europe (SANE) in Amsterdam)) sowie Beiträge von weiteren Konferenzen und Veranstaltungen angefragt und ausgewertet (unter anderem von Council of European Aerospace Societies (CEAS), New Aircraft Concept REsearch (NACRE) und Greener by Design).<sup>4</sup>

In Anbetracht der Vielschichtigkeit des Themas wurde eine qualitative Erhebung als Kernmethode gewählt. Zu jedem Hauptpunkt dieser Arbeit wurde mindestens ein Expertengespräch geführt. Insgesamt wurden neun Experten befragt (siehe Anhang B). Dem unter 1.2. angeführten Perspektivenschwerpunkt entsprechend stellt die Deutsche Lufthansa den Großteil der Gesprächspartner. Die hier gewonnenen Erkenntnisse über das „Innenleben“ der Luftfahrt, konnten im Gespräch mit Airbus abgerundet und erweitert werden. Das persönliche Gespräch mit dem DLR vertiefte

---

<sup>4</sup> Greener by Design ist ein unabhängiges Beratungsinstitut der Royal Aeronautical Society (Greener by Design 2007:24).



den bestehenden fachlichen Austausch mit der Einrichtung.<sup>5</sup> Insbesondere zur Bewertung der zukünftigen technischen Entwicklung wurden zwei Experten der HAW herangezogen. Um nicht ausschließlich die Perspektive der Industrie (Deutsche Lufthansa, Airbus) sowie wissenschaftlicher Institutionen (DLR, HAW) zu erfassen, wurde zudem Greenpeace als eine der zentralen Umweltorganisationen Deutschlands befragt.

Da die Positionen politischer Entscheidungsträger im Rahmen der besuchten Konferenzen erfasst werden konnten bzw. diese durch diverse Publikationen hinreichend kommuniziert werden, schienen hier zusätzliche Expertengespräche nicht zwingend erforderlich.

## **2. Klimawirksamkeit der globalen Zivilluftfahrt**

Kapitel zwei begründet die thematische Grundlage und Relevanz der weiteren Analyse. Dies erfolgt in drei Schritten. Zunächst kommt es zu einer überwiegend quantitativen Charakterisierung der Zivilluftfahrt auf globaler Maßstabsebene (2.1.1.). In diesem Zusammenhang werden Abschätzungen über den weiteren Verlauf der Luftfahrt (2.1.2.) und der damit verbundenen Emissionen (2.1.3.) getroffen. Darauf aufbauend wird in einem zweiten Schritt der Versuch unternommen, die Klimawirksamkeit der Luftfahrt einer Detail- (2.2.1. und 2.2.2.) sowie Gesamtbetrachtung (2.2.3.) zu unterziehen. Der letzte Schritt (2.3.) fasst die wesentlichen Aussagen des Kapitels zu einem Zwischenfazit zusammen.

### **2.1. Globale Zivilluftfahrt**

Ziel dieses Hauptabschnitts ist es die globale Zivilluftfahrt anhand der wichtigsten Kennzahlen quantitativ zu erfassen. Hierzu wird die jüngste Entwicklung bis zum heutigen Stand verfolgt (2.1.1.). Im Anschluss thematisiert 2.1.2. Entwicklungsprognosen, die unter Berücksichtigung der aktuellen Wirtschaftsentwicklung bewertet werden. Mit den daraus gewonnen Erkenntnissen

---

<sup>5</sup> Unter anderen stellte das Institut für Antriebstechnik, das Institut für Lufttransportkonzepte und Technologiebewertung sowie das Institut für Physik der Atmosphäre Dokumente und Materialien zur Verfügung.

lassen sich Abschätzungen über die zukünftige Entwicklung der Emissionshöhe treffen (2.1.3.), die für Hauptabschnitt 2.2. von elementarer Bedeutung sind.

### **2.1.1. Charakterisierung der Luftfahrt heute**

Als das zentrale Element der Luftfahrt (vgl. 1.2.) ist der Luftverkehr seit Ende der siebziger Jahre stark gewachsen (Airbus 2007a:41). Allein zwischen 1995 und 2005 wies der globale Luftverkehr eine durchschnittliche Jahreswachstumsrate von 5,2 Prozent auf (ICAO 2006b:22).<sup>6</sup> Im Jahr 2007 wurden laut dem Official Airline Guide (OAG) weltweit 29,6 Millionen Linienflüge registriert (OAG 2007a:1). Dies ist die „highest ever number recorded“ und mit 4,7 Prozent Wachstum gegenüber 2006 auch der „largest year-on-year increase since 2004“ (beide OAG 2007b). Im europäischen Linienflugverkehr, welcher knapp 40 Prozent des gesamten internationalen Personenflugverkehrs ausmacht (ICAO 2007a:1), wurden 2007 erstmals mehr als zehn Millionen Flüge erfasst (Eurocontrol 2008a:1). Die International Civil Aviation Organization (ICAO) nennt für 2007 ein Gesamtwachstum (des internationalen und des Inlandsverkehrs) von sechs Prozent auf 2,2 Milliarden Passagiere (2007a:1). Abbildung 2.1. zeigt die Entwicklung des weltweiten Passagieraufkommens seit 2000.<sup>7</sup>

---

<sup>6</sup> Zum Vergleich wuchs die Weltwirtschaft in diesem Zeitraum jährlich um lediglich 3,6 Prozent (ICAO 2006b:21).

<sup>7</sup> Die ebenfalls gezeigte Prognose ab 2005 wird im folgenden Abschnitt besprochen.

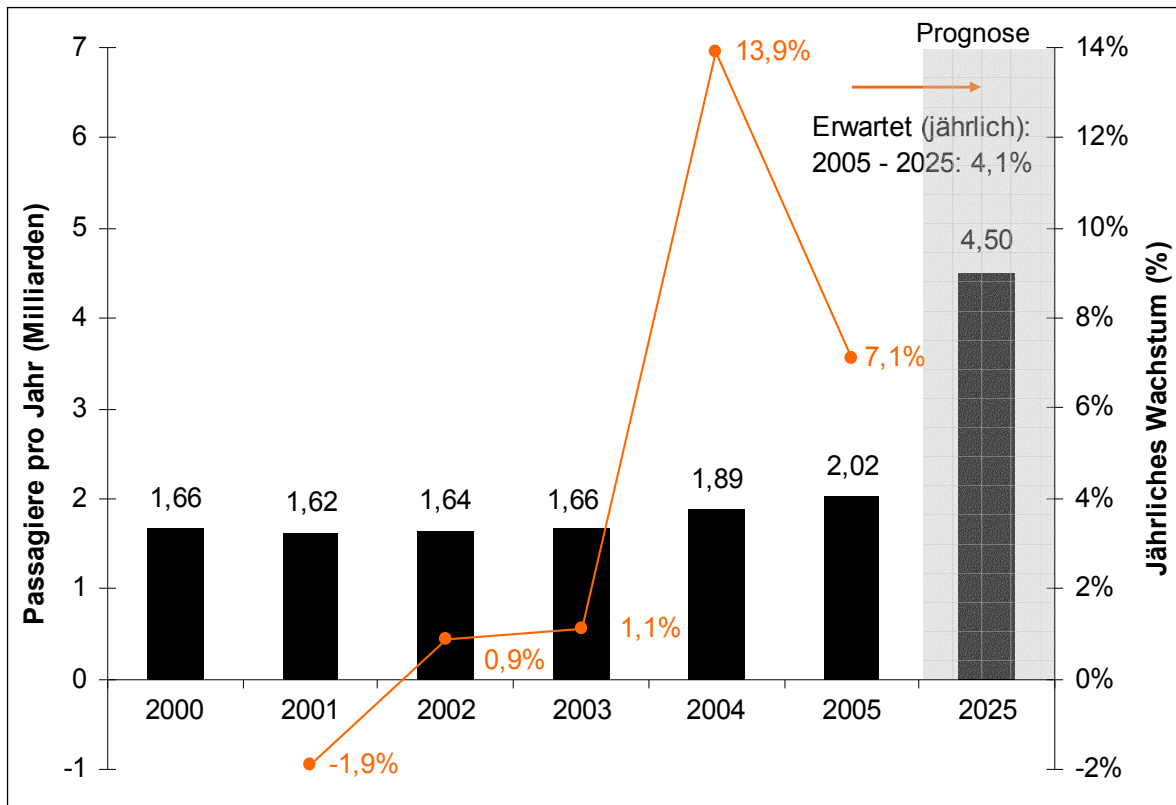


Abb. 2.1.: Entwicklung des weltweiten Passagieraufkommens von 2000 bis 2005 und Prognose für 2025. (Quelle: Eigene Darstellung auf Datenbasis von ICAO 2006b:7ff. und ICAO 2007b:2)

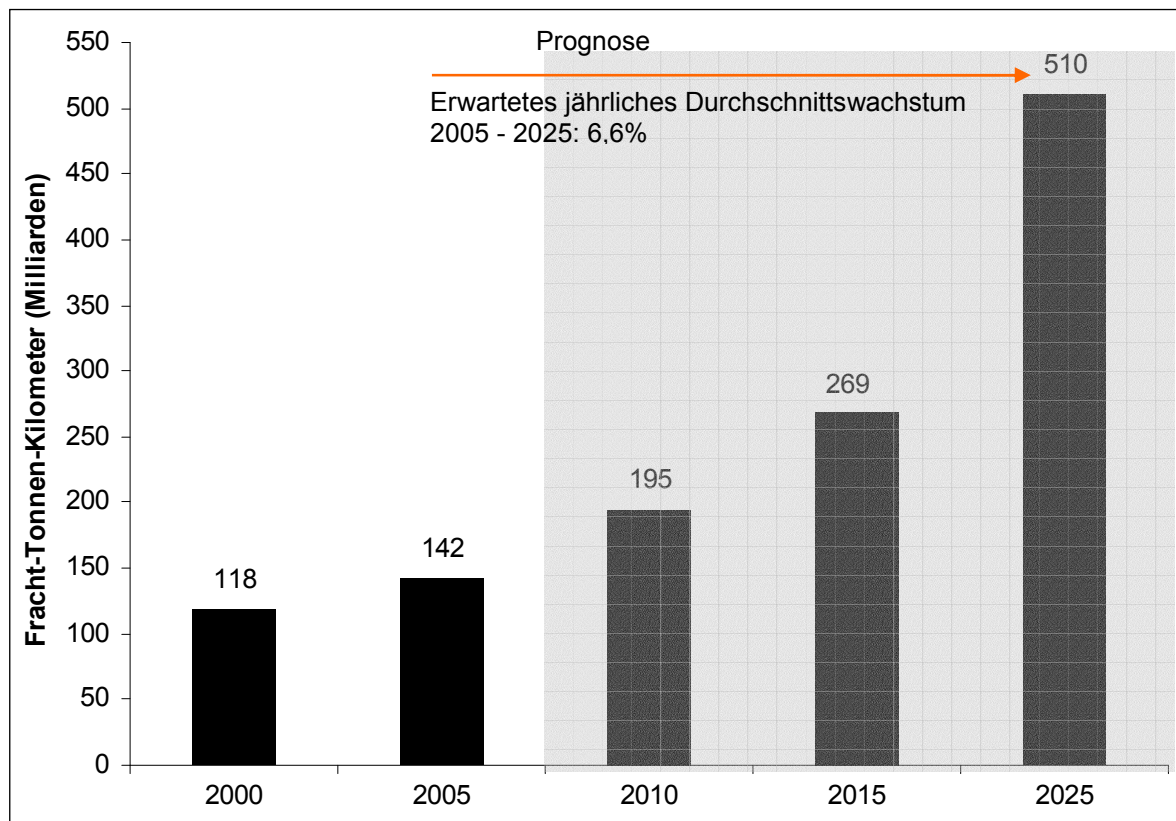


Abb. 2.2.: Weltweites Frachtaufkommen 2000, 2005 und Prognose bis 2025. (Quelle: Eigene Darstellung auf Datenbasis von ICAO 2002:3 und ICAO 2007b:2)

Auch das globale Frachtaufkommen, gemessen in Fracht-Tonnen-Kilometer, ist in den vergangenen Jahren deutlich (vgl. Abb. 2.2.) und zuletzt (2007) um 3,5 Prozent gewachsen.<sup>8</sup> Insgesamt wurde 2007 die Rekordsumme von etwa 41 Millionen Tonnen Frachtgut im inländischen und länderübergreifenden Luftfrachtverkehr transportiert (ICAO 2007a:1).

Die zivile Luftfahrtindustrie konnte im Rahmen der gezeigten Entwicklung 2007 einen Nettogewinn von 5,6 Milliarden USD realisieren (IATA 2008a).<sup>9</sup> Laut ATAG (Airport Transport Action Group) beschäftigte die Luftfahrtindustrie 2006 global etwa 32 Millionen Menschen (2008a).<sup>10</sup>

### **2.1.2. Entwicklungsprognosen für die Luftfahrt**

Die Entwicklung der Luftfahrt ist eng verknüpft mit dem Konjunkturverlauf der Weltwirtschaft, da dieser sich direkt auf den kommerziellen Personen- und Frachtverkehr sowie indirekt auf den Freizeitverkehr auswirkt. Die Korrelation zeigt sich in 2008 besonders deutlich. Während der Passagierverkehr in der ersten Jahreshälfte um durchschnittlich 5,4 Prozent stieg, verlangsamte sich das Wachstum im Zuge der einsetzenden Finanzkrise zunächst, um darauf den ersten Rückgang zu verzeichnen (siehe IATA 2008b und IATA 2008c). Der Internationale Währungsfonds (International Monetary Fund, IMF) geht in seiner jüngsten Prognose vom November 2008 davon aus, dass sich das Wachstum der Weltwirtschaft von den erwarteten 3,7 Prozent in 2008 auf 2,2 Prozent in 2009 abschwächen wird (IMF 2008a:1). Folglich wurden auch die Prognosen für den Luftverkehr auf 3,0 Prozent (Passagierverkehr) bzw. 2,5 Prozent (Frachtverkehr) Wachstum abgesenkt (IATA 2008d:4). Mittel- bis langfristig wird sich an dem starken Wachstum des Luftverkehrs bzw. der Luftfahrt mit hoher Wahrscheinlichkeit nichts ändern. Dies liegt erstens daran, dass der Luftverkehr in den vergangenen Jahrzehnten nahezu durchgängig stärker

---

<sup>8</sup> Die Einheit Fracht-Tonnen-Kilometer drückt die tatsächlich erbrachte Frachtleistung aus. Sie ist das Produkt aus transportierter Fracht in Tonnen und zurückgelegter Entfernung in km (vgl. Klußmann 2007:293).

<sup>9</sup> Zu der Luftfahrtindustrie gehören nach Pompl die „Gesamtheit der ökonomischen, organisatorischen und technischen Einrichtungen des Lufttransportes zur Produktion und Bereitstellung von Luftfahrzeugen und Infrastruktureinrichtungen wie Flughäfen oder Flugsicherungsanlagen“ (2007:17).

<sup>10</sup> Diese setzen sich aus direkten Arbeitsplätzen (5,5 Millionen überwiegend bei Fluggesellschaften), indirekten Arbeitsplätzen (6,3 Millionen durch den Verkauf von Gütern und Dienstleistungen der weiteren Versorgungskette), induzierten Arbeitsplätzen (2,9 Millionen durch Ausgaben der Industrieangestellten) sowie direkten und indirekten Arbeitsplätzen der Tourismusbranche (17,1 Millionen) zusammen (ebd.).

gewachsen ist als die Weltwirtschaft (vgl. Airbus 2007a:41, IMF 2008b, IATA 2008e:10). Zweitens ist parallel zur Finanzkrise der Rohölpreis deutlich gesunken (Times Online 2008). Diese Entwicklung dürfte den konjunkturbedingten Nachfragerückgang zumindest partiell kompensieren und die Auswirkungen auf die Industrie damit begrenzen.<sup>11</sup> Darüber hinaus hat sich die Luftfahrtindustrie in der Vergangenheit als äußerst robust gegenüber externen Schocks erwiesen. Airbus betont, dass die Industrie sowohl durch die Ölkrise in den achtziger Jahren als auch durch jüngere Schockereignisse (Asienkrise Ende der Neunziger, Ereignisse vom 11. September 2001, SARS 2003) jeweils nur temporär getroffen wurde, um im Anschluss den stetigen Wachstumspfad erneut aufzunehmen (2007a:41). In Abbildung 2.1. sind sowohl die Auswirkungen des 11. September 2001 als auch das im Anschluss deutlich gesteigerte Wachstum (2004) zu erkennen.<sup>12</sup> Ein vergleichbarer Verlauf dürfte in den folgenden Jahren als Reaktion auf die derzeit anstehende Verlangsamung des weltweiten Wirtschaftswachstums zu erwarten sein. Die mittel- bis langfristigen Prognosen dürften damit als weiterhin gültig betrachtet werden. Diese gehen davon aus, dass sich die Anzahl der Passagiere im weltweiten Luftverkehr bis 2025 gegenüber 2007 auf 4,5 Milliarden mehr als verdoppeln wird (siehe Abschnitt 2.1.1. und Abb. 2.1.). Die ICAO schätzt, dass sich das geleistete Frachtaufkommen bis 2025 im Vergleich zu 2005 auf 510 Milliarden Fracht-Tonnen-Kilometer mehr als verdreifachen wird (Abb. 2.2.).<sup>13</sup> Entgegen der kurzfristig zu erwartenden moderaten Entwicklung des Luftverkehrs, stehen die „Zeichen“ in der Luftfahrt mittel- bis langfristig auf Wachstum. Vor diesem Hintergrund wird die Betrachtung der Luftverkehrsemissionen zunehmend wichtiger.

### **2.1.3. Verbrennungsprodukte der Luftfahrt**

Bei der Verbrennung von Flugzeugtreibstoff entstehen Emissionen. Abbildung 2.3. zeigt die typischen Emissionen, die bei der Verbrennung eines Kilogramms Kerosin in einem Standardtriebwerk entstehen. Es handelt sich um Durchschnittswerte, die je nach Flugphase (Start, Landung, Gleitflug, etc.) und eingesetztem Triebwerkstyp

---

<sup>11</sup> Dennoch rechnet die Luftfahrtindustrie für dieses Jahr mit einem Verlust von etwa 5,2 Milliarden USD (IATA 2008d:1).

<sup>12</sup> Frota bemerkt im Expertengespräch zwar, dass die Produktion von Airbus durch die stagnierende Wirtschaftsentwicklung bereits beeinflusst wird, verweist jedoch gleichzeitig auf das „strong order book“ (vgl. Anhang B).

<sup>13</sup> Weitere Branchenschätzungen wie die des Triebwerksherstellers Rolls Royce (2006:36) liegen teilweise deutlich darüber (681 Milliarden) bzw. darunter (440 Milliarden bei Airbus (2007a:112)).

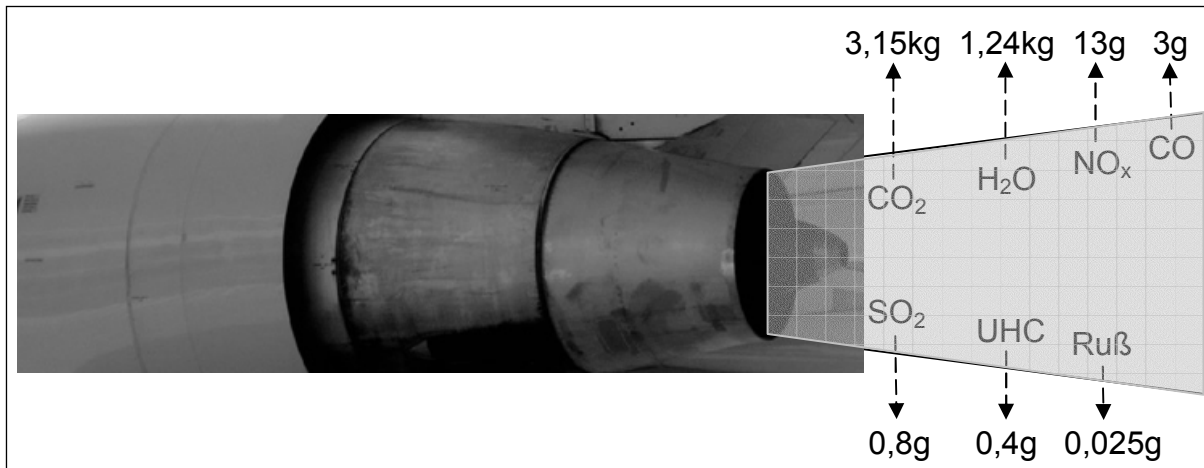


Abb. 2.3.: Durchschnittliche Verbrennungsprodukte eines Verkehrsflugzeugs. Angaben pro kg verbranntem Kerosin. (Quelle: Eigene Darstellung nach Mensen 2007:870 und Schumann et al. 2007:9)

variieren können (Mensen 2007:873).<sup>14</sup> Mit durchschnittlich 3,15 kg pro verbranntem kg Kerosin macht Kohlendioxid den Großteil der Emissionen aus. Im Vergleich dazu ist die ausgestoßene Menge an Schwefeldioxid (SO<sub>2</sub>), unverbrannten Kohlenwasserstoffen (UHC) sowie Ruß gering (siehe Abb. 2.3.). Die ATAG (Air Transport Action Group) gibt für 2005 einen globalen Kerosinverbrauch des zivilen Luftverkehrs in Höhe von 170 Millionen Tonnen an (2008b).<sup>15</sup>

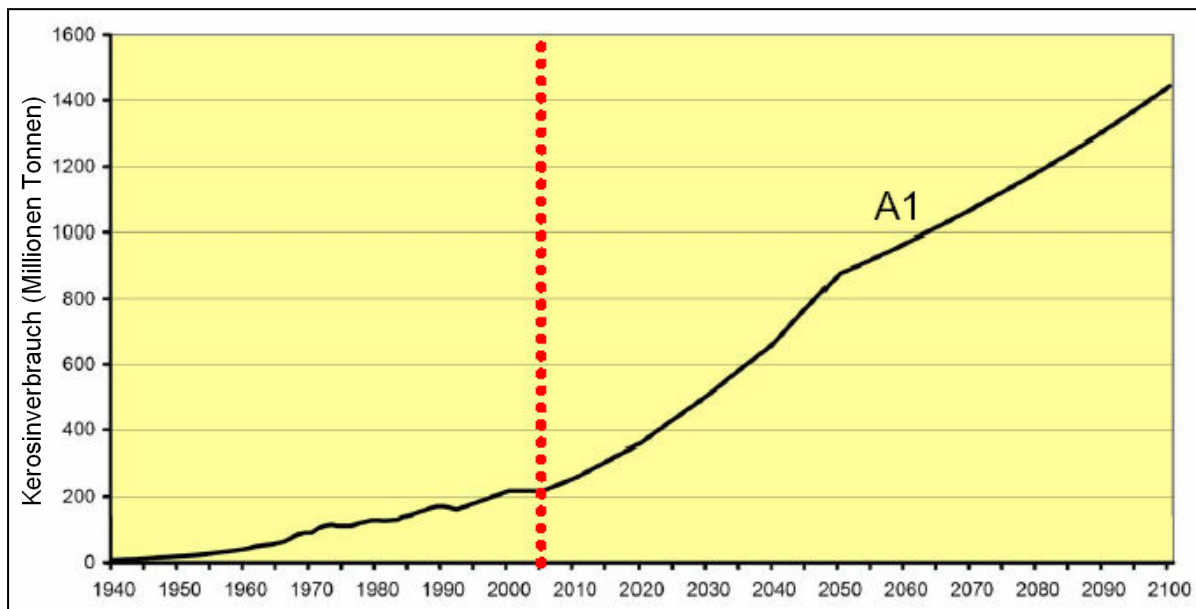


Abb. 2.4.: Entwicklung und Prognose des Kerosinverbrauchs der globalen Luftfahrt (zivil und militärisch). Prognose ab 2006 (rote Linie) für ein IPCC Szenario der Familie A1. Die A1 Szenarienfamilie geht von einem starken Wirtschaftswachstum in Kombination mit einer raschen Einführung neuer und effizienterer Technologien aus (IPCC 2007a:18). (Quelle: Nach Schumann 2007a:25)

<sup>14</sup> Triebwerke werden unter 4.1.1. ausführlich thematisiert.

<sup>15</sup> Verlässliche Angaben jüngeren Datum sind derzeit nicht verfügbar. Auch die ICAO bezieht sich im Rahmen eines Treffens zum Thema Luftfahrt und Klimawandel im Juli 2008 auf Kerosinangaben für das Jahr 2005 (vgl. ICAO 2008a:4).

Nach Schätzung des Deutschen Zentrums für Luft- und Raumfahrt (DLR) wird sich die Zunahme des globalen Kerosinverbrauchs (zivil und militärisch) im Luftverkehr bis zum Ende des Jahrhunderts fortschreiben (siehe Abb. 2.4.).<sup>16</sup>

Verglichen mit dem starken Wachstum der Transportleistung (vgl. Abb. 2.2.) fielen die jährlichen Wachstumsraten des Kerosinverbrauchs mit zwei bis drei Prozent zwischen 1990 und 2004 damit geringer aus (Schumann 2007b:1). Dies liegt vor allem an der technischen Weiterentwicklung, die den spezifischen Kraftstoffverbrauch in den vergangenen 40 Jahren „um rund die Hälfte“ (Schumann et al. 2007:6) senken konnte. Vertreter der Luftfahrtindustrie sprechen von etwa 70 Prozent seit Beginn des Jetzeitalters (Airbus 2007a:14, Boeing 2008a:16 und ATAG 2008a:3).<sup>17</sup> Die Deutsche Lufthansa zeigt die „Entkoppelung von Transportleistung und Umweltbelastung“ (Deutsche Lufthansa 2008a:67) anhand der Schadstoffentwicklung ihrer Flotte seit 1991 (siehe Abb. 2.5.).

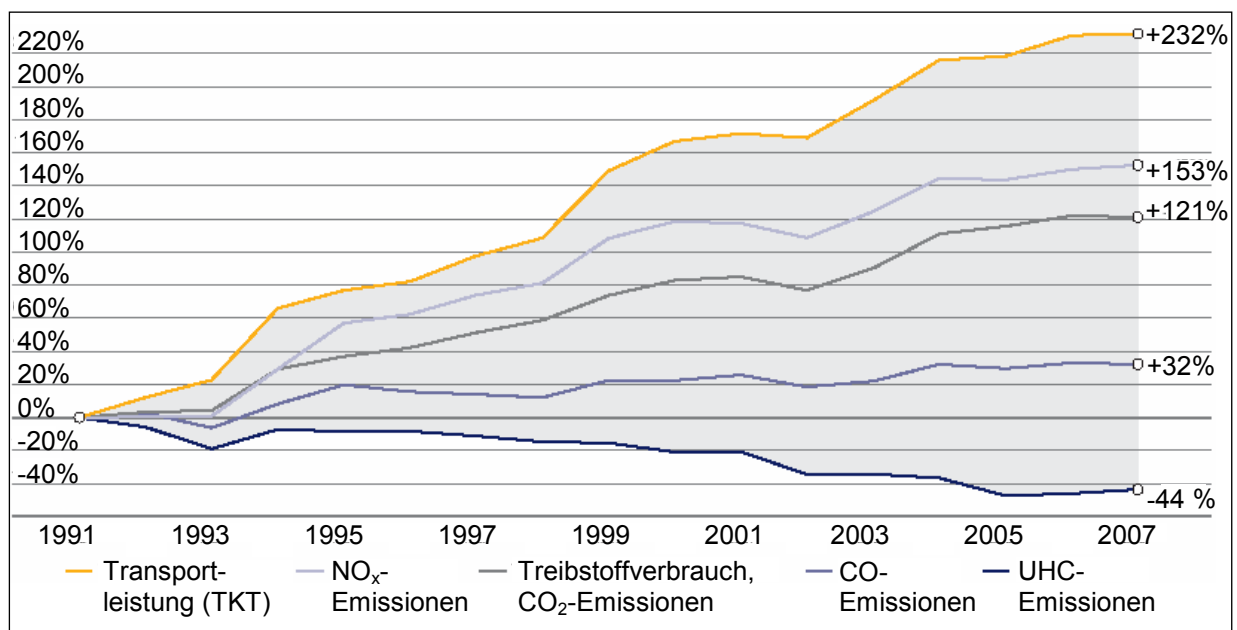


Abb. 2.5.: Entwicklung der Transportleistung und der Emissionen der Lufthansa Konzernflotte zwischen 1991 und 2007. Dargestellt wird die prozentuale Veränderung gegenüber 1991. Die Einheit TKT (Ton Kilometers Transported) entspricht Fracht-Tonnen-Kilometern (siehe Abb. 2.2.) wobei die Passagiere über ein Durchschnittsgewicht erfasst werden (Deutsche Lufthansa 2008a:110). UHC sind unverbrannte Kohlenwasserstoffe. (Quelle: Aus Deutsche Lufthansa 2008a:67, überarbeitete Beschriftung)

Trotz der bisher erzielten Steigerung der Treibstoffeffizienz verbrauchte die Lufthansa Flotte 2007 knapp sieben Millionen Tonnen Kerosin und setzte damit 100 000 Tonnen Stickoxide sowie rund 22 Millionen Tonnen Kohlendioxid frei

<sup>16</sup> Zum Verbrauch pro Tag siehe Abb. 4.5. in 4.1.2.

<sup>17</sup> Zum Begriff des „Jetzeitalters“ siehe 4.1.1.

(Deutsche Lufthansa 2008a:65).

Für die weitere Diskussion in 2.2. ist nicht nur die Quantität der Emissionen sondern auch die sphärische Höhe relevant. Abbildung 2.6. zeigt die typische geographische Verteilung der Luftfahrtemissionen am Beispiel der Stickoxide.

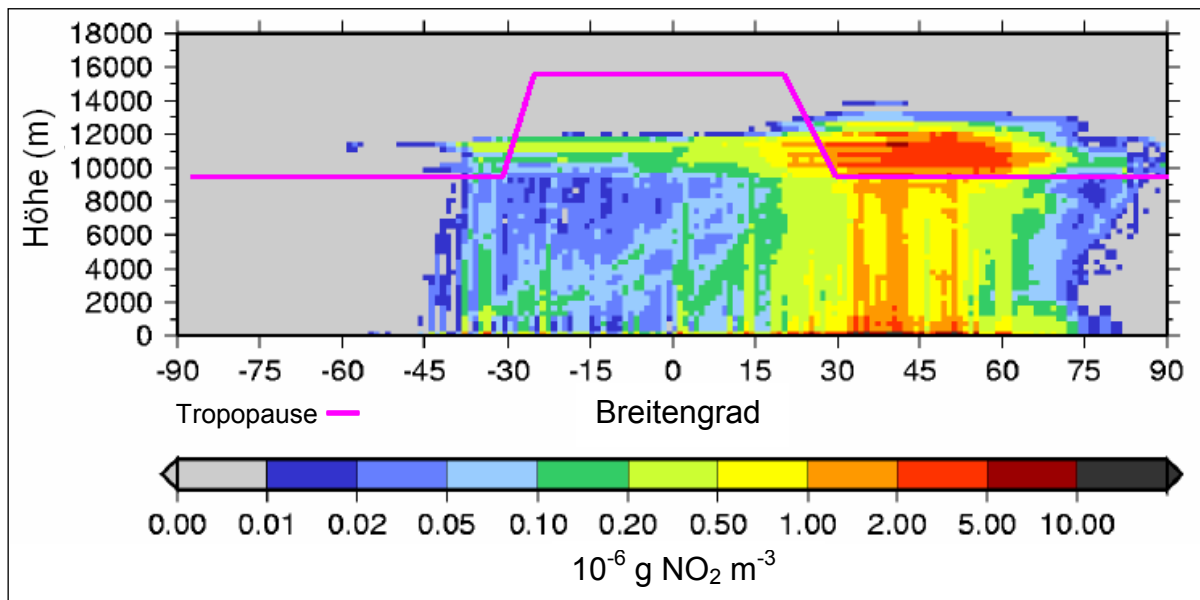


Abb. 2.6.: Globale und vertikale Verteilung der luftverkehrsbedingten Emissionen dargestellt am Beispiel der Stickoxidkonzentration. (Quelle: Übersetzt und leicht modifiziert nach Schumann 2007a:6)

Zwei wesentliche Punkte werden hier deutlich. Zum einen fällt auf, dass die Hauptemissionen zwischen dem 30. und 60. nördlichen Breitengrad zu verzeichnen sind. Dies überrascht nicht, da in diesem Gürtel der Hauptverkehr zwischen den Drehkreuzen Nordamerikas, Europas und Asiens abgewickelt wird. Zum anderen ist zu bemerken, dass sich die Hauptkonzentration der Emissionen in einer Höhe von 10 bis 12 km und damit in der oberen Hälfte der üblichen Reiseflughöhe (8 bis 12 km) befindet (Kraabøl et al. 1999:289). Rund 40 Prozent der Emissionen erfolgen oberhalb der Tropopause (Schlager et al. 2007:11). Diese Erkenntnis spielt bei der nun folgenden Wirkungseinschätzung der Emissionen eine entscheidende Rolle.

## 2.2. Klimawirksamkeit der Luftfahrt

Die vorangegangenen Abschnitte schilderten die Quantität, die geographische Verteilung und den zu erwartenden Anstieg der Luftverkehrsemissionen. Auf dieser Grundlage werden sich die folgenden Abschnitte mit der daraus resultierenden



Klimawirksamkeit beschäftigen.<sup>18</sup> Zunächst werden die direkte (2.2.1.) und die indirekte (2.2.2.) Wirkung der Flugzeugemissionen diskutiert, um diese im Anschluss unter 2.2.3. zu einem klimarelevanten Gesamtbeitrag (der Klimawirksamkeit) zusammenzuführen. In diesem Zusammenhang wird auch die Messgröße der Klimawirksamkeit diskutiert.

### **2.2.1. Direkte Wirkung der Emissionen**

Kohlendioxid ist das Hauptverbrennungsprodukt der Triebwerke (vgl. Abb. 2.3.). Tabelle 2.1. zeigt die wesentlichen Charakteristika von Kohlendioxid im Vergleich zu weiteren wichtigen anthropogenen Treibhausgasen.<sup>19</sup> Es wird deutlich, dass Kohlendioxid aufgrund der langen molekularen Lebenszeit und des hohen Strahlungsantriebs den größten Anteil am anthropogenen Treibhauseffekt ausmacht. Der Strahlungsantrieb (radiative forcing) gibt an, wie stark sich ein bestimmtes Gas auf den Strahlungshaushalt der Erde auswirkt (Rahmstorf und Schellnhuber 2007:35). Ausgedrückt in Watt pro Quadratmeter zeigt der Strahlungsantrieb bei positivem Vorzeichen die Erwärmung bzw. bei negativem Vorzeichen die Abkühlung pro Flächeneinheit (ebd.).<sup>20</sup> Da sich Kohlendioxid rasch und gleichmäßig in der Atmosphäre, den Ozeanen sowie Teilen der Biosphäre verteilt, spielt es für die Klimawirksamkeit keine Rolle, ob die Emission in erdnahen oder erdfernen Schichten erfolgt (IPCC 1999:197). Im Gegensatz dazu fällt die Treibhauswirkung der übrigen Flugzeugemissionen aufgrund ihrer verlängerten chemischen Lebenszeit auf Reiseflughöhe unterschiedlich aus (Burckhardt et al. 2006:1). So steigt in Höhen zwischen 9 und 13 km beispielsweise die Stickoxidanreicherung durch die geringe Oxidationskapazität der Atmosphäre (ebd.). In der Troposphäre führen Stickoxide zur Bildung von Ozon, wo dieses strahlungswirksam wird (vgl. Tab. 2.1. und Schumann 2008:144).<sup>21</sup>

---

<sup>18</sup> Wie eingangs erwähnt, ist die Klimawirksamkeit eine Kenngröße für die Stärke der Klimabeeinflussung (vgl. 1.2.).

<sup>19</sup> Der Begriff „Treibhausgas“ wird in dieser Arbeit ebenso als bekannt vorausgesetzt wie dessen grundlegende Wirkung.

<sup>20</sup> Auf die Validität des Strahlungsantriebs als Messgröße wird unter 2.2.3. näher eingegangen.

<sup>21</sup> Grewe et al. geben für 2000 eine luftfahrtinduzierte Ozonsteigerung von fünf Prozent an (2002). Siehe hierzu auch Sausen und Schumann 2000.

	<b>Kohlen- dioxid (CO<sub>2</sub>)</b>	<b>Methan (CH<sub>4</sub>)</b>	<b>Distick- stoffoxid (N<sub>2</sub>O)</b>	<b>Tropos. Ozon (O<sub>3</sub>)</b>
<b>Strahlungsantrieb im Jahr 2005 (in Watt/m<sup>2</sup>)*</b>	1,66	0,48	0,16	0,35
<b>Unsicherheitsspanne (in Watt/m<sup>2</sup>)</b>	1,49 bis 1,83	0,43 bis 0,53	0,14 bis 0,18	0,25 bis 0,65
<b>Mittlere molekulare Lebenszeit (in Jahren)</b>	100	12	114	0,15
<b>Anteil am natürlichen Treibhauseffekt (in %)**</b>	22	2	4	9
<b>Anteil am anthropogenen Treibhauseffekt (in %)***</b>	61	15	4	9

\*Ergänzung: Der Strahlungsantrieb stratosphärischen Ozons beträgt -0,05 Watt/m<sup>2</sup> (-0,15 bis 0,05 Watt/m<sup>2</sup>), \*\*fehlende Prozente verteilen sich auf H<sub>2</sub>O (60 %) und andere Gase (3 %), \*\*\*fehlende Prozente Fluorchlorkohlenwasserstoff (11 %)

Tab. 2.1.: Charakteristika wichtiger anthropogener Treibhausgase. (Quelle: Eigene Darstellung nach Schönwiese 2003:337, aktualisiert durch IPCC 2007d:141 und 2007d:212)

Die Erwärmung wird verstärkt durch den stickoxidbedingten Ozonabbau in der Stratosphäre (IPCC 1999:22), wo Ozon einen leicht kühlenden Effekt auf die Erdoberfläche ausübt (vgl. Tab. 2.1.). Die Wirkung der Stickoxide ist dennoch nicht ausschließlich Temperatur erhöhend. Durch die Reduktion von Methan oberhalb der Tropopause wird der positive Gesamtstrahlungsantrieb der Stickoxide reduziert (Schumann et al. 2007:8 und Tab. 2.1.). Ebenfalls kühlend – wenn auch in geringerer Magnitude – fällt die direkte Wirkung der Sulfataerosole aus, die bei der Oxidation von Schwefeldioxid (SO<sub>2</sub>) Emissionen entstehen (siehe Abb. 2.7.).<sup>22</sup> Ein zusätzliches, hier nicht weiter relevantes Folgeprodukt ist die Schwefelsäure (H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>).<sup>23</sup> Die durch unvollständige Verbrennung entstehenden Rußpartikel weisen aufgrund ihrer geringen Menge lediglich einen nur leicht positiven Strahlungsantrieb auf (vgl. Abb. 2.3. und Abb. 2.7.). Dieser ist vergleichbar mit dem Strahlungsantrieb von Wasserdampf, welcher zwar in größerem Volumen, jedoch mit deutlich geringerer (direkter) Wirksamkeit emittiert wird (ebd.).<sup>24</sup>

Abbildung 2.7. fasst die flugzeuginduzierten Strahlungsantriebe der einzelnen Emissionen für 1992 und 2000 zusammen.

<sup>22</sup> Zur näheren Behandlung der Flugzeug emittierten Aerosole siehe Scott et al. 2005.

<sup>23</sup> Siehe hierzu Seinfeld und Pandis 2006:29f.

<sup>24</sup> Die indirekte Wirkung von Wasserstoff wird im folgenden Abschnitt thematisiert.

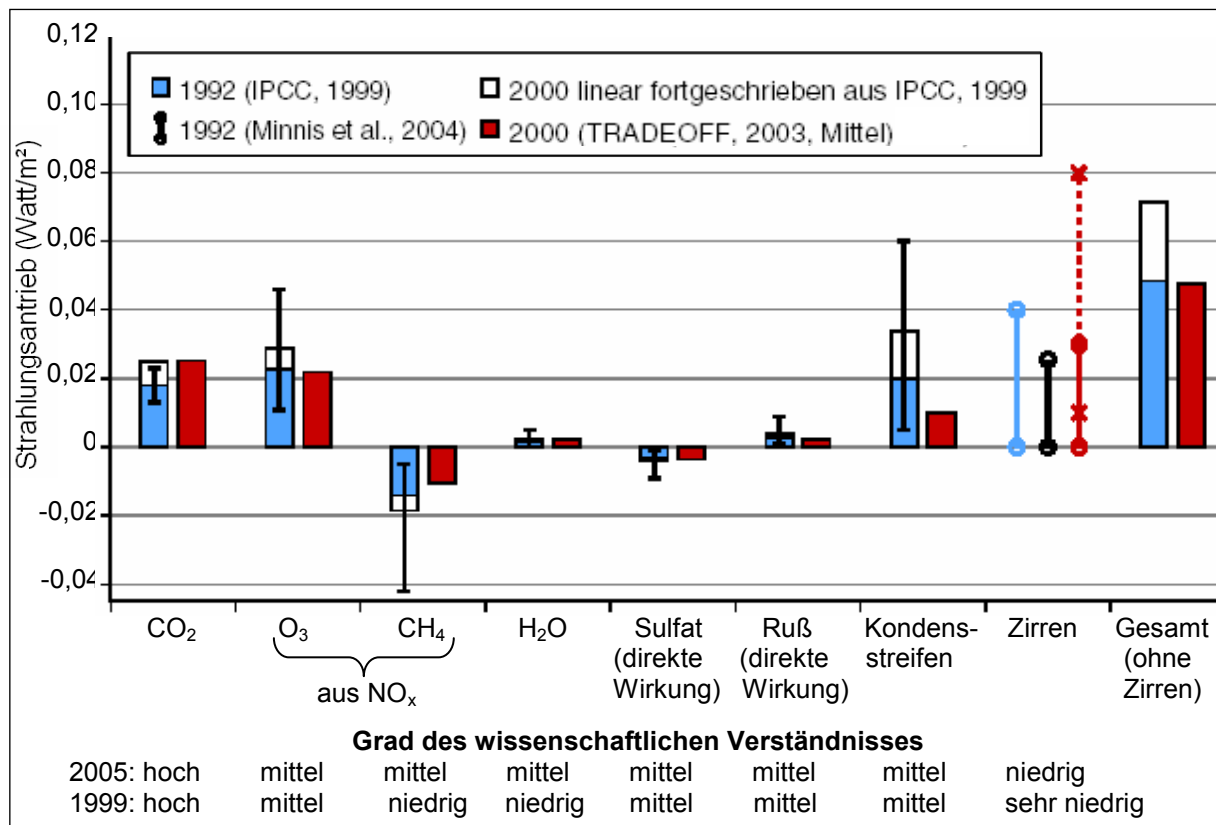


Abb. 2.7.: Der luftfahrtinduzierte Strahlungsantrieb und seine Komponenten. Bei den Werten handelt es sich um gemittelte, globale Strahlungsantriebe für das Jahr 1992 (blauer Balkenanteil) und 2000 (weißer Balkenanteil bzw. rote Balken) basierend auf IPCC und TRADEOFF Ergebnissen. Die schwarzen Linien repräsentieren die Unsicherheitsspannen. Der gesamte Strahlungsantrieb umfasst nicht die Wirkung der Zirren. Ihr Strahlungsantrieb wird separat durch drei Linien dargestellt, wobei die roten Kreuze die Unsicherheitspanne für 2000 markieren. (Quelle: Eigene Übersetzung von Sausen et al. 2005:556, leicht modifiziert und ergänzt um den Grad des wissenschaftlichen Verständnisses für 1999 aus IPCC 1999:7)

Bisher wurden lediglich die ersten fünf in Abbildung 2.7. aufgeführten Strahlungsantriebelemente besprochen. Die Betrachtung der Strahlungsantriebe durch Wolkenbildung sowie die Diskussion des Gesamtstrahlungseffekts folgen in 2.2.2. bzw. 2.2.3.

## 2.2.2. Indirekte Wirkung durch Wolkenbildung

Der hier vorliegende Abschnitt beschäftigt sich mit dem speziell durch Flugzeugemissionen induzierten Phänomen der Kondensstreifen- und Zirruswolkenbildung. Die Bildung von sichtbaren Kondensstreifen sowie deren klimatische Wirkung hängen maßgeblich von den atmosphärischen Voraussetzungen ab, unter denen die Emission erfolgt. In trockener Luft ist der ausgestoßene Wasserdampf weitgehend unproblematisch, da sich die durch Kondensation

entstandenen Wassertropfen nach wenigen Sekunden auflösen (Schumann et al. 2007:9).<sup>25</sup>

Anders verläuft dieser Prozess in kalter und feuchter Umgebungsluft. Hier gefrieren die Tropfen zunächst, um dann unter Aufnahme weiteren Wasserdampfs zu wachsen (Mannstein und Schumann 2005:549).<sup>26</sup> Abbildung 2.8. zeigt Kondensstreifen über dem Südosten der USA.

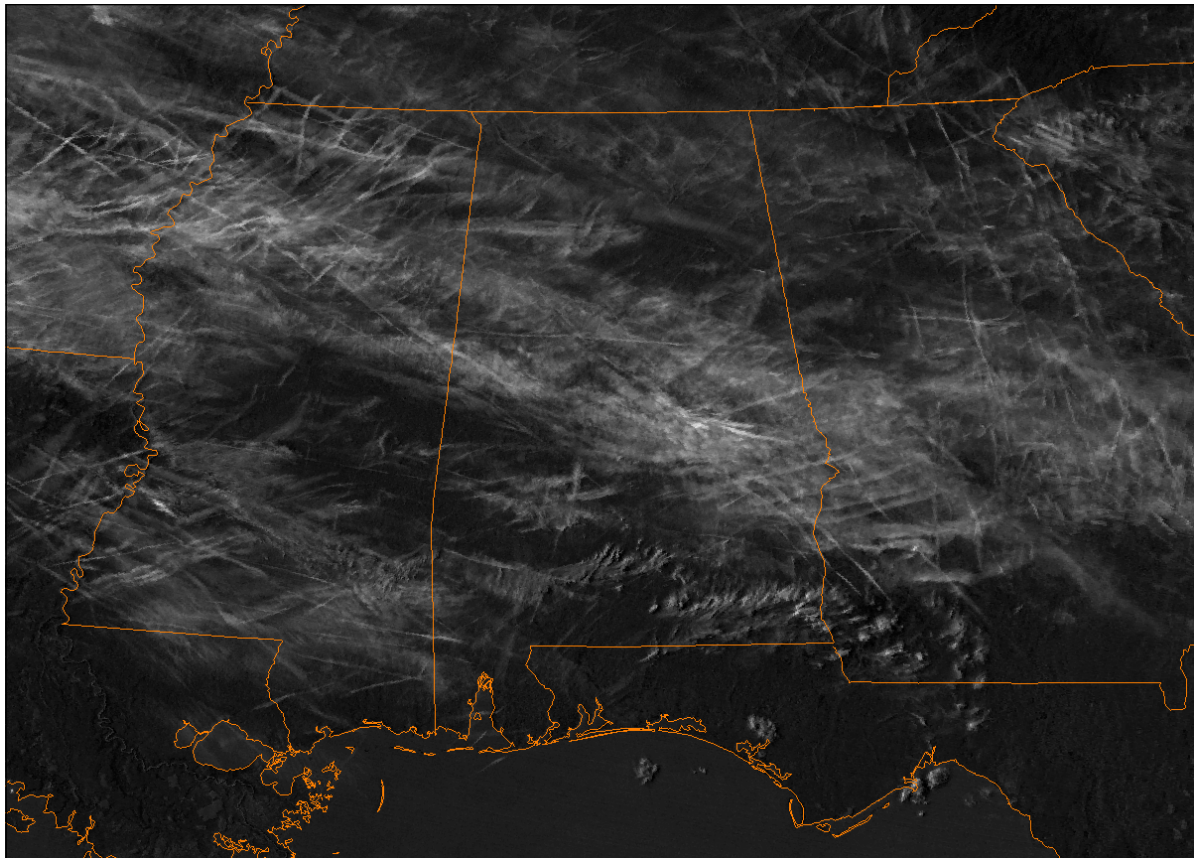


Abb. 2.8.: Kondensstreifen über dem Südosten der USA. Aufgenommen vom Satelliten TERRA am 06.03.2007. (Quelle: Aus NASA 2007)

Die optische Dicke der Kondensstreifen wird von lokalen Faktoren wie dem Sättigungsüberschuss und der Windscherung beeinflusst (Burckhardt et al. 2006:2), wobei die Lebensdauer der Kondensstreifen mehrere Stunden betragen kann (Marquart 2003:1). Der durch Kondensstreifen verursachte Strahlungsantrieb wurde im Vergleich zu ersten Schätzungen (hauptsächlich durch IPCC 1999 und Marquart 2003) mittlerweile auf  $0,01 \text{ Watt/m}^2$  herunterkorrigiert (vgl. Abb. 2.7.). Dies liegt vor allem daran, dass sich in einer späteren Untersuchung (TRADEOFF 2003 in

<sup>25</sup> Als Kondensationskerne dienen unter anderen auch die emittierten Ruß- und Sulfataerosole (siehe vorherige Abschnitte).

<sup>26</sup> Die detaillierte atmosphärische Grundlage dieses Ablaufs spezifiziert das Schmidt-Appleman-Kriterium, ausführlich behandelt in Schumann 1996.

CORDIS 2005) die Kondensstreifen als optisch dünner und damit weniger wärmend erwiesen als zunächst angenommen (Schumann et al. 2007:9). Insgesamt ist die Bewertung des Prozesses der Kondensationsstreifenbildung, der vornehmlich in der Troposphäre abläuft, weiterhin mit Unsicherheiten behaftet (IPCC 2007d:187).

Der Grad des wissenschaftlichen Verständnisses nimmt bei der Betrachtung von künstlichen Zirruswolken, die durch Änderungen der „macroscopic structure“ und „microscopic composition“ (beide Mannstein und Schumann 2005:549) aus Kondensstreifen entstehen, weiter ab. Mit Hilfe von Satellitenszenen (vgl. Abb. 2.8.) wird versucht, flugzeuginduzierte von natürlichen Zirruswolken zu unterscheiden und Abschätzungen über den Bedeckungsgrad zu treffen.<sup>27</sup> Über Mitteleuropa bedecken die hauptsächlich in der Troposphäre auftretenden Wolken etwa 0,5 Prozent des Himmels (Schumann et al. 2007:9).

Während Zirren nachts zur Erderwärmung beitragen, ist tagsüber ein vereinzelt auftretender, kühlender Effekt möglich (ebd.). Mannstein und Schumann glichen 2005 Satellitenszenen mit Flugverkehrsdaten für Europa ab und kamen zu überraschenden Ergebnissen. So resümierten sie: „Der durch zusätzliche Zirren verursachte Strahlungsantrieb kann mehr als 10 mal größer sein als derjenige, der durch lineare Kondensstreifen oder durch das vom Flugverkehr emittierte CO<sub>2</sub> verursacht wird“ (2005:549). Zwar haben die Autoren diese Aussage mittlerweile „als nicht stichhaltig“ (Mannstein und Schumann 2007:131) zurückgenommen, dennoch sind auch heute Werte bis 0,08 Watt/m<sup>2</sup> „nicht auszuschließen“ (Schumann et al. 2007:9). Wie auf Abbildung 2.7. zu erkennen ist, wurde die Zirrenentwicklung 2005 als einziges Element mit einem „niedrigen“ Grad des wissenschaftlichen Verständnisses ausgewiesen. Gleichzeitig birgt es das größte Potenzial, die Gesamtbewertung der luftfahrtbedingten Klimawirksamkeit grundlegend zu ändern (ebenfalls Abb. 2.7.).

### **2.2.3. Gesamtklimawirksamkeit**

Um den Einfluss des globalen Luftverkehrs auf die Atmosphäre darzustellen, werden zwei Werte besonders häufig herangezogen. Zum einen wird der Anteil der globalen Luftfahrt an der anthropogen produzierten Menge Kohlendioxids angeführt. Dabei werden sowohl reine Kohlendioxidmengen als auch Kohlendioxid-Äquivalente zur

---

<sup>27</sup> Zur Zirrenidentifizierung siehe Krebs 2006:29f.

Berechnung benutzt (beispielsweise IATA 2007a und Germanwatch 2008:39). Zum anderen wird der in 2.2.1. genannte flugzeuginduzierte Strahlungsantrieb ins Verhältnis zu dem anthropogenen Gesamtstrahlungsantrieb gesetzt (IPCC 2007c:331, ICAO 2008b).

Der erste Wert beträgt laut DLR etwa 2,2 Prozent (Schumann 2008:143).<sup>28</sup> Der Luftfahrtanteil am gesamten Kohlendioxidausstoß des weltweiten Verkehrssektors betrug 2000 etwa 11,6 Prozent (IPCC 2007c:328.) Wird der Kohlendioxidausstoß des Luftverkehrs dagegen in Kohlendioxid-Äquivalenten (und damit unter Berücksichtigung der kohlendioxidfernen Treibhausgase) angegeben, so fällt dieser deutlich höher aus. Das Umweltbundesamt nennt für den Luftverkehr in Deutschland (für 2005) einen durchschnittlichen Kohlendioxidausstoß in Kohlendioxid-Äquivalenten von 369 Gramm pro Person und Kilometer (g/pkm) (UBA 2007a).<sup>29</sup> Zum Vergleich gibt die Deutsche Lufthansa für 2005 einen durchschnittlichen Kohlendioxidausstoß (ohne kohlendioxidferne Gase) in Höhe von 111 g/pkm für ihre Flotte an (2007a:61). Einer 2008 veröffentlichten Studie des Wuppertal Instituts für Klima, Umwelt und Energie zufolge wird die Klimawirkung des Luftverkehrs in Deutschland (gemessen in Kohlendioxid-Äquivalenten), die des Pkw-Verkehrs möglicherweise bereits 2012, spätestens aber ab 2020 übertreffen (Schallaböck 2008:85 und Schallaböck in TAZ 2008a).

In der Klimaforschung hat sich dagegen der Strahlungsantrieb als Referenzmaß für die Messung anthropogener Störungen etabliert (vgl. unter anderen Stuber et al. 2005:497, IPCC 2007d:133ff. und Schumann 2008:143). Unter zusätzlicher Berücksichtigung eines konstanten Parameters, welcher die Klimasensitivität erfasst, wird mit Hilfe des Strahlungsantriebs die Veränderung der globalen Bodengleichgewichtstemperatur ermittelt (siehe Ponater et al. 2006 und Sausen 2007a:9ff.).<sup>30</sup> Dieses Vorgehen wird im Falle des Luftverkehrs jedoch zunehmend als ungenau kritisiert, da „vielfältige Rückwirkungen im Klimasystem, beispielsweise durch Änderung der Luftfeuchte und Bewölkung bei einer Erwärmung“ (Schumann 2008:143) keine Berücksichtigung finden. Zudem ist die Verwendung eines

---

<sup>28</sup> Eigene Berechnungen kommen für 2005 auf einen ähnlichen Wert von 2,0 Prozent: Anteil globaler Kohlendioxidausstoß der zivilen Luftfahrt 540 Millionen Tonnen (ATAG 2008b) am Gesamtausstoß von 27 136 Millionen Tonnen (IEA 2007:120).

<sup>29</sup> Zweitgrößter Emittent ist der Pkw mit 144 g/pkm (ebd.).

<sup>30</sup> Die Klimasensitivität gibt an, um wieviel Grad sich die Gleichgewichtstemperatur der Erdoberfläche infolge einer Verdoppelung der Kohlendioxidkonzentration (von 280 auf 560 ppm (parts per million)) erhöht. Derzeit wird von einer Klimasensitivität von drei Grad Celsius (Unsicherheitsspanne von ein bis vier Grad Celsius) ausgegangen (Rahmstorf und Schellnhuber 2007:44).

konstanten Klimasensitivitätsparameters bei verschiedenen Störungen fehlgeschlagen (siehe Stuber et al. 2005, Ponater et al. 2006:191ff.). Auch der Versuch die Strahlungswirkung kohlendioxidferner Gase durch die Einführung eines Indexes („Radiative Forcing Index“) zu erfassen, hat sich vor allem für die Bewertung des zukünftigen Luftverkehrs als ungeeignet erwiesen (Sausen 2007a:29). Bisherige Ansätze, die versuchten diese Schwächen durch eine stärkere Einbeziehung der zeitlichen Komponente (Sausen 2007a:30) oder durch so genannte Impuls-Reaktions-Funktionen (Forster und Gregory 2006, Forster und Taylor 2006 und Marais et al. 2008) zu kompensieren, erreichten bisher noch nicht die erforderliche Belastbarkeit um den Strahlungsantrieb als zentrale Messgröße abzulösen. Bis dies der Fall ist, wird der Strahlungsantrieb als Richtmaß weiter zur Anwendung kommen. Die derzeit aktuellste Schätzung für den flugverkehrsbedingten Strahlungsantrieb beträgt 0,053 Watt/m<sup>2</sup> für das Jahr 2005 (siehe IPCC 2007c:331). Sie beruht auf der von Sausen et al. getroffenen Abschätzung für 2000 (vgl. Abb. 2.7.) mit einem geringen Aufschlag von zehn Prozent „because of slow growth in aviation fuel use between 2000 and 2005“ (IPCC 2007d:186). Der genannte Wert entspricht etwa drei Prozent des gesamten anthropogenen Strahlungsantriebs von 1,6 Watt/m<sup>2</sup> (Unsicherheitsspanne von 0,6 bis 2,4 Watt/m<sup>2</sup>) für 2005 (IPCC 2007c:331). Auf Grundlage der heutigen Metrik wird daher davon ausgegangen, dass der globale Luftverkehr zu etwa drei bis vier Prozent (0,02 bis 0,03 Grad Celsius) zur Erwärmung der Erdoberfläche um 0,76 Grad Celsius (zwischen 1900 und 2000) beigetragen hat (Mannstein und Schumann 2008:4, IPCC 2007a:5 und 2007a:14).

Hierzu muss jedoch auf die unter 2.2.2. gemachte Feststellung verwiesen werden, wonach die erwärmende Wirkung der Zirruswolken möglicherweise den gesamten Strahlungseffekt aller Flugzeugemissionen deutlich übersteigt (Abb. 2.7.). Der Autor dieser Arbeit hält die vollständige Ausklammerung der Zirruswolken bei der Gesamtbewertung des Strahlungsantriebs für nicht unproblematisch. Das IPCC begründet dieses Vorgehen mit „uncertainty in the optical properties of Aviation Induced Cloudiness (AIC) and in the assumptions used to derive AIC cover“ (2007d:187). Sicherlich ist eine vorschnelle Bildung eines „best estimates“ auf einer unsicheren Grundlage nicht sinnvoll. Dennoch lagen drei umfassende Studien (IPCC 1999, Minnis et al. 2004 sowie TRADEOFF 2003 (in CORDIS 2005)) vor, deren

Schätzungen alle zwischen 0,02 und 0,04 Watt/m<sup>2</sup> lagen (vgl. Abb. 2.7.).<sup>31</sup> Zudem wurden bereits 1999 mit einem „geringen“ Grad des wissenschaftlichen Verständnisses bewertete Komponenten (CH<sub>4</sub> sowie H<sub>2</sub>O) unter Ausweisung einer größeren Unsicherheitsspanne in die Gesamtbetrachtung einbezogen (siehe unterste Zeile Abb. 2.7.). Ein ähnliches Vorgehen wäre 2005 (durch Sausen et al.) spätestens jedoch 2007 (durch das IPCC) analog für die Zirruswirkung wünschenswert gewesen, da es dem Umstand Rechnung getragen hätte, dass der Gesamtstrahlungsantrieb der Luftfahrt mit hoher Wahrscheinlichkeit im oberen Bereich der Unsicherheitsspanne von 0,03 bis 0,13 Watt/m<sup>2</sup> (vgl. IPCC 2007c:331) liegt. In Folge dessen wäre der Flugverkehr eher für acht Prozent (0,06 Grad Celsius) der bisherigen Erderwärmung um 0,76 Grad Celsius verantwortlich.

Zusammenfassend lässt sich damit festhalten, dass die Luftfahrt unter Verwendung der aktuellen Metrik zu unrecht als „Klimakiller“ dargestellt wird.<sup>32</sup> Gleichzeitig muss jedoch bemerkt werden, dass der Strahlungsantrieb nicht optimal geeignet ist, um die Klimawirksamkeit des Luftverkehrs zu erfassen. Zudem unterschätzt der derzeit ausgewiesene Strahlungsantrieb, aufgrund der Ausklammerung des Zirreneffekts, die tatsächliche Wirkung der Flugzeugemissionen um möglicherweise mehr als die Hälfte. Weiter wurde gezeigt, dass der Luftverkehr wie kein anderer Verkehrssektor in sensitiven Höhenbereichen auf vielfältige und komplexe Weise Einfluss auf atmosphärische Prozesse nimmt.

Die Wirkung der einzelnen Emissionskomponenten hängt stark von dem betrachteten Zeitraum ab. Langfristig trägt Kohlendioxid, bedingt durch die längere Lebensdauer und die Trägheit des Atmosphäre-Erde-Systems, am stärksten zur Erwärmung bei. Auf kurze bis mittlere Sicht werden die induzierte Wolkenbildung sowie die Stickoxide eine größere Rolle spielen.

### **2.3. Zwischenfazit**

Der Luftverkehr hat in den letzten 30 Jahren und insbesondere seit den Neunzigern deutlich zugenommen (2.1.1.). Nach einer kurzfristig zu erwartenden Dämpfung des

---

<sup>31</sup> Eine von Krebs 2006 veröffentlichte Untersuchung lag mit 0,034 Watt/m<sup>2</sup> ebenfalls in der angegebenen Spanne (2006:117).

<sup>32</sup> Die Bezeichnung „Klimakiller“ wird sowohl von Umweltorganisationen wie Germanwatch (2005:4), BUND (2008), WWF (2008) und Greenpeace (2008:24) also auch vereinzelt von Zeitungen (TAZ 2007, Frankfurter Rundschau 2008 und Hamburger Abendblatt 2008) verwendet.



Wachstums, ausgelöst durch die prognostizierte Stagnation der Weltwirtschaft, wird sich diese Entwicklung voraussichtlich fortsetzen. Bis 2025 könnte sich so das Passagier- und Frachtaufkommen nahezu verdoppeln bzw. verdreifachen (2.1.2.). Hieraus ergibt sich eine erhöhte Relevanz für die Klimawirksamkeit der Luftfahrt. Nach derzeit verwendeter Metrik ist der Luftverkehr weder im Hinblick auf den reinen Kohlendioxid ausstoß noch im Hinblick auf den Strahlungsantrieb signifikant für den Klimawandel verantwortlich zu machen (2.2.3.). Die aktuell verwendete Bewertungsmethode weist jedoch grundlegende und Luftfahrt spezifische Schwächen auf. Die Klimawirksamkeit der Luftfahrt wird dadurch mit hoher Wahrscheinlichkeit unterschätzt (ebd.).

### **3. Szenarienperspektive**

Die Intension der Szenarienperspektive ist es einen Denkraum zu eröffnen, innerhalb dessen zukünftige Möglichkeiten diskutiert werden können.<sup>33</sup> Die folgend entworfenen Szenarien sind daher nicht als Vorhersage der Zukunft zu verstehen. Vielmehr schreiben sie die in Kapitel zwei angelegten Entwicklungspfade fort und bilden eine Grundlage, um die in Kapitel vier angeführten Ansätze unter einer „Wenn-dann-Konstellation“ zu untersuchen. Die Szenarienperspektive wird damit insbesondere als Grundlage für die zweite Leitfrage dieser Arbeit (siehe 1.1.) eingeführt.

Um diese aufzubauen, führen die zwei in 3.1. und 3.2. entworfenen Szenarien bis zum Jahr 2030 zu unterschiedlichen Situationen. Das erste Szenario endet in einer Situation, die die Obergrenze einer Druckkulissee markiert (daher Upper Bound Szenario). Das zweite Szenario hingegen beschreibt einen Verlauf, der 2030 eine Druckreduzierung gegenüber 2008 bedeutet (Lower Bound Szenario). Der Druck ist dabei als ein Resultat von Ereignissen und Entwicklungen zu verstehen, der auf den Akteuren aus Luftfahrtindustrie und Politik lastet, Ansätze zur Reduzierung der Klimawirksamkeit umzusetzen. Abbildung 3.1. skizziert den Verlauf der Szenarien. Es wird angenommen, dass der Druck bis 2028 stetig sinkt (Upper Bound Szenario)

---

<sup>33</sup> Bows et al. bezeichnen die Szenarienmethode aus diesem Grund als „learning machines“ (2009:105). Nach Haggett ist es eine zentrale Aufgabe des Geographen „verschiedene Perspektiven unseres Aufenthalts auf der Erde“ und „optimistische wie auch pessimistische Vorstellungsbilder für die Zukunft dieses Planeten“ (beide 2004:781) aufzuzeigen.

bzw. steigt (Lower Bound Szenario), um sich dann innerhalb von zwei Jahren deutlich in die entgegengesetzte Richtung umzukehren. Dieser Verlauf soll verdeutlichen, dass nur wenige Ereignisse erforderlich sind, um einen drastischen Druckumschwung innerhalb einer kurzen Zeitspanne herbeizuführen. Das Szenariende wurde auf 2030 gelegt, da sich zu diesem Zeitpunkt die Ober- und Untergrenzen der verschiedenen IPCC Szenarien erstmalig merklich differenzieren lassen (vgl. Abb. 3.2.). Zudem liegt das ausgewählte Jahr zwischen den bereits heute formulierten Klimazielen der EU für 2020 (Reduzierung der Treibhausgase um 20 Prozent gegenüber 1990) und der G8-Staaten für 2050 (Reduzierung der Treibhausgase um 50 Prozent gegenüber 1990) (European Commission 2008a und G8 2008:1).<sup>34</sup>

Der entworfene Ansatz basiert im Wesentlichen auf den Luftfahrtszenarien Fc1 bzw. Edh sowie den Emissionsszenarien A1B bzw. B1 des IPCCs (siehe Tab. 3.1., IPCC

<b>Szenario</b>	<b>Upper Bound</b>	<b>Lower Bound</b>
<b>Durchschnittliches Weltwirtschaftswachstum pro Jahr (2000 - 2030 in %)</b>	2 - 3	< 2
<b>Durchschnittliches Luftverkehrswachstum pro Jahr (2000 - 2030 in %)</b>	4,7	2,2
<b>Durchschnittliche Treibstoffwachstumsrate pro Jahr (2000 - 2030 in %)</b>	3,8	0,8
<b>Technologieeinsatz zur CO<sub>2</sub>-Reduzierung</b>	gering	hoch
<b>Anteil am anthropogenen SA (im Jahr 2030 in %)</b>	22 - 24	2 - 4
<b>Druck auf die Politik und Luftfahrtindustrie (im Jahr 2030)</b>	sehr hoch	sehr gering
<b>Szenariengrundlage</b>	IPCC: A1B und Edh Sausen et al. 2005 AERO2K et al. 2007	IPCC: B1 und Fc1

Tab. 3.1.: Zusammenfassung des Upper Bound und Lower Bound Szenarios. (Quelle: Eigener Entwurf basierend auf IPCC 1999:5, IPCC 2000:130, Sausen et al. 2005:556 sowie Fleming et al. 2007:8)

1999:5 sowie IPCC 2000:130). Das Upper Bound Szenario (im Folgenden UBS genannt) wird zudem im Bereich der Zirruswolkenbildung durch Sausen et al.

<sup>34</sup> Sicherlich wäre auch ein Szenarienenwurf über das Jahr 2030 hinaus denkbar. Mit längerem Abschätzungszeitraum nehmen jedoch auch die ohnehin vorhandenen Unsicherheiten zu. Aus diesem Grund scheint das gewählte Jahr ein sinnvoller Kompromiss aus IPCC Vorgabe und Zukunftsnähe zu sein.

(2005:556) sowie im Hinblick auf die Klimawirksamkeit der Luftfahrt durch vier weitere Studien (vgl. Fleming et al. 2007) ergänzt (siehe auch Abb. 3.3 und Abb. 3.4.).

Zur Anwendung kommen die Szenarien jeweils am Ende eines jeden Unterpunktes in Kapitel vier.<sup>35</sup> Es wird dabei stets von der Drucksituation am Ende des Szenarios ausgegangen.

### **3.1. Upper Bound Szenario**

Die globale Erderwärmung soll auf höchstens zwei Grad Celsius gegenüber dem vorindustriellen Niveau (1900) begrenzt werden. Im Jahr 2009 legen die Regierungsvertreter der G8-Staaten daher eine Treibhausgasreduktion von 40 Prozent bis 2020 sowie von 60 Prozent bis 2050 gegenüber 1990 fest. Zu einer Einbeziehung der globalen Luftfahrt in das Kyoto-Nachfolgeprotokoll kommt es nicht. Das Kyoto-Nachfolgeprotokoll wird bis zum in Kraft treten 2012 von allen Industrienationen sowie der überwiegenden Mehrheit der Schwellenländer ratifiziert.

Die Weltwirtschaft wächst weiter jährlich um zwei bis drei Prozent bei zunehmend intensiverer Globalisierung (vgl. Tab. 3.1.). Im Rahmen der gesteigerten weltweiten Vernetzung kann das Flugzeug seine Stellung als wichtigster Verkehrsträger weiter ausbauen. Mit dieser Entwicklung hat auch die weltweit sehr gut organisierte Luftfahrtindustrie deutlich an Stärke und Einfluss gewonnen. Sie versteht es durchweg, den Luftverkehr als zentrales Standbein der Weltwirtschaft mit großem gesellschaftlichen Nutzen und sehr geringer Klimarelevanz darzustellen. Allein aus dem Motiv der Kostensenkung heraus, wird die Kerosineffizienz (Verbrauch pro Passagierkilometer) gesteigert. Der reale Verbrauchszuwachs wird hierdurch jedoch nur unwesentlich gemindert (Verlauf etwa wie in Kapitel zwei Abb. 2.4.).

Externe Anreize Treibhausgasemissionen zu senken bestehen für die stark wachsende Luftfahrtindustrie nicht (Wachstumsrate siehe Tab. 3.1.).

Zu Beginn der dritten Dekade des 21. Jahrhunderts stellt sich heraus, dass die Reduzierungsvorgaben (für 2020) von dem Großteil der beteiligten Länder nicht

---

<sup>35</sup> Da sich der Unterpunkt 4.3. ausschließlich mit einem Thema beschäftigt, wird die Szenarienperspektive hier nur einmal zum Ende von 4.3.3. eingenommen.

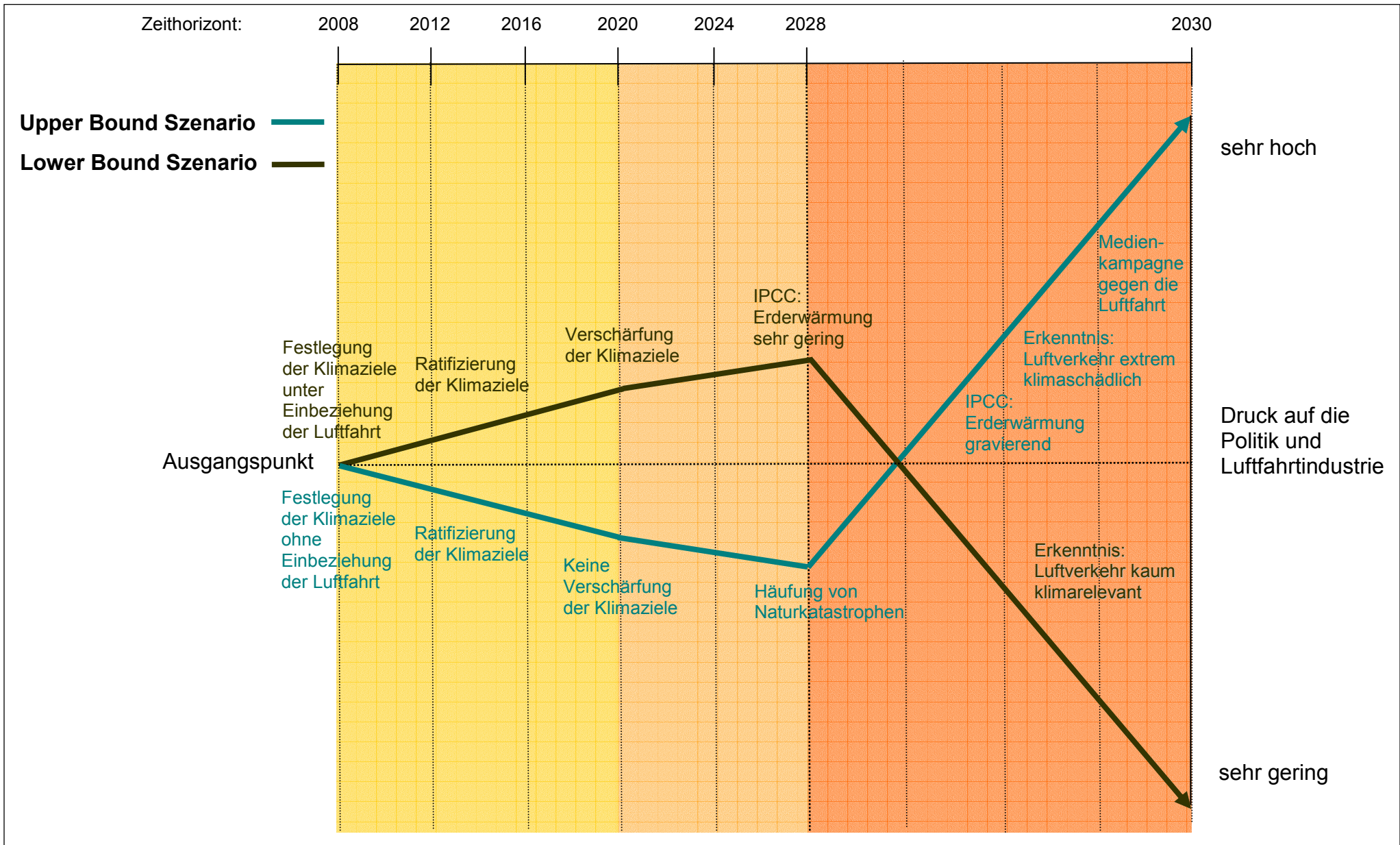


Abb. 3.1.: Vereinfachte Darstellung des Upper Bound und Lower Bound Szenarios anhand des Druckverlauf und der wichtigsten Ereignisse. (Quelle: Eigener Entwurf)

eingehalten werden konnten. Für das Verfehlen der Klimaziele werden hauptsächlich die Industrien der Schwellenländer (vornehmlich China und Indien) verantwortlich gemacht. Der Luftverkehr bleibt weiter vorgabenfrei. Auch weil die globale Erwärmung weiterhin im Mittel der vom IPCC 2007 entworfenen Szenarien liegt, nimmt der Druck auf die Luftfahrtindustrie weiter ab (siehe Abb. 3.1. und Abb. 3.2.). Dies ändert sich zwischen 2028 und 2030 radikal (ebd.). Zunächst kommt es zu einer extremen Häufung von Naturkatastrophen.<sup>36</sup> Als Folge rückt das bis dahin in den

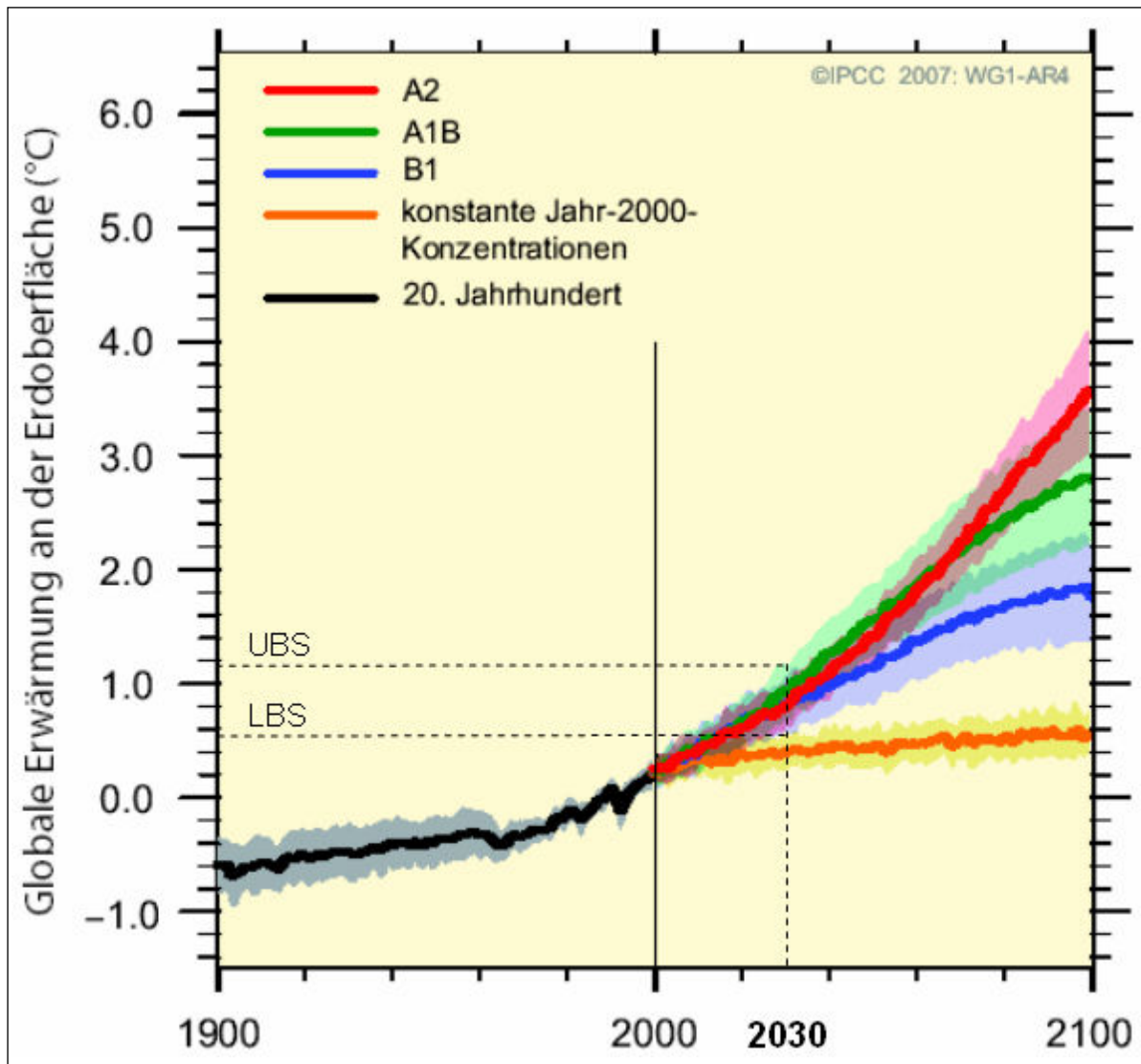


Abb. 3.2.: Globale Erderwärmung für verschiedene IPCC Szenarien. Dargestellt werden der Verlauf der globalen Erderwärmung an der Erdoberfläche bis 2000 sowie der Verlauf für die IPCC Szenarien A2, A1B und B1 bis 2100 im Vergleich zur konstant bleibenden Kohlendioxidkonzentration von 2000. Die Schattierung kennzeichnen die Unsicherheitsspannen der einzelnen Szenarien. Das UBS und das LBS gehen von einer Erwärmung von ca. 1,8 Grad Celsius (oberer Rand des A1B Szenarios) bzw. ca. 1,2 Grad Celsius (unterer Rand des B1 Szenarios) gegenüber 1900 aus. (Quelle: Modifiziert nach IPCC 2007a:14)

<sup>36</sup> Denkbar wäre eine sehr hohe Anzahl an Einzelereignissen wie etwa in 2007 (960) gepaart mit einer hohen Opferzahl wie in 2008 (235 000) (Münchner Rück 2008).

Hintergrund geratene Thema des Klimawandels wieder in den öffentlichen Fokus. Es stellt sich heraus, dass sich die globale Erwärmung mit 1,8 Grad Celsius bereits am obersten Rand des 2007 vom IPCC entworfenen Szenarios A1B befindet (siehe Abb. 3.2.). Die „Zwei-Grad-Celsius-Grenze“ (siehe oben) ist damit bereits sehr nahe gerückt.

Auf der Suche nach den Ursachen fällt schnell das Stichwort „Luftverkehr“. Parallel veröffentlicht das DLR eine Studie, die die offenen Fragen in Punkto Kondensstreifen

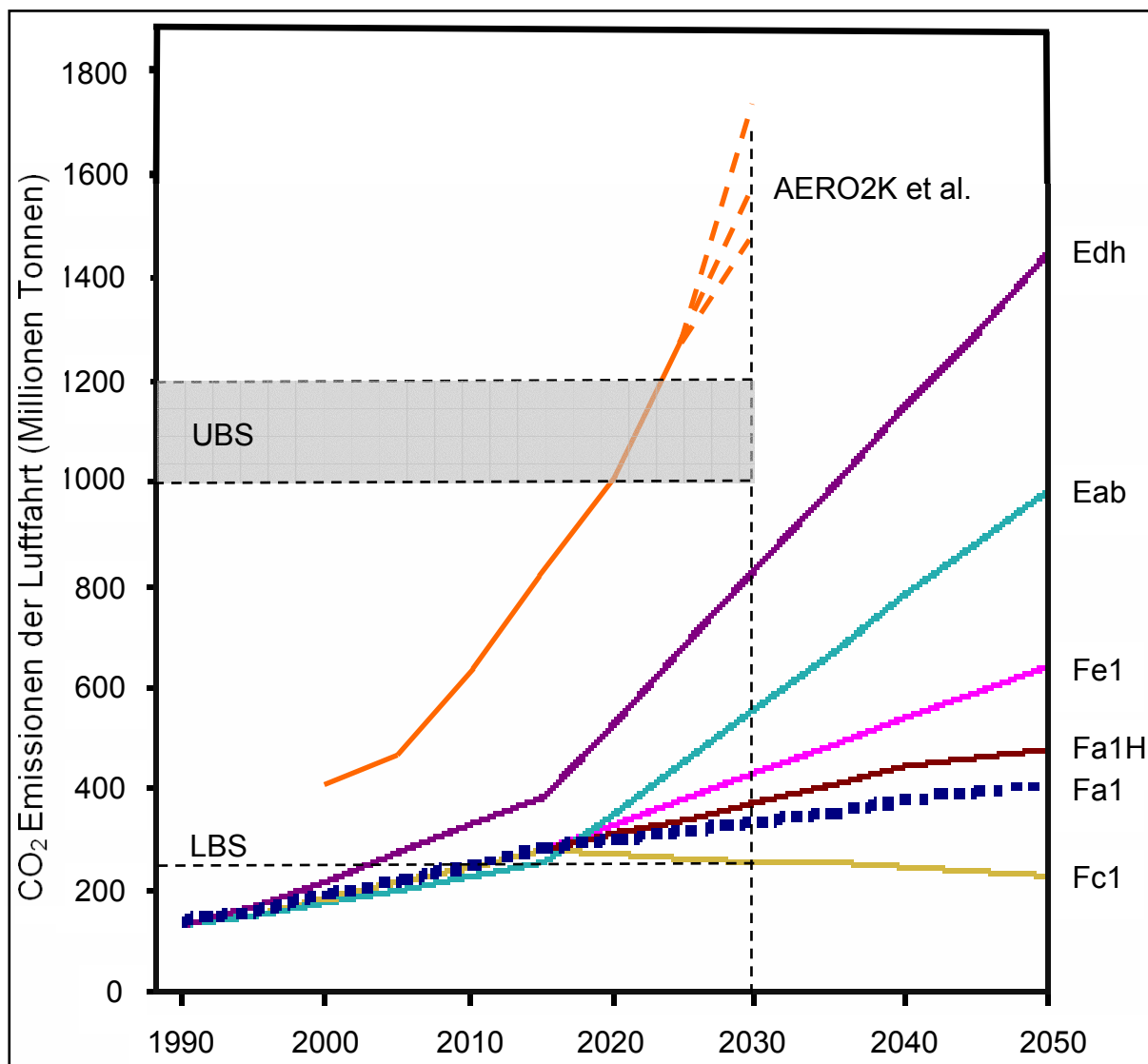


Abb. 3.3.: Entwicklung und Prognose der Kohlendioxidemissionen der globalen Luftfahrt. Die unteren sechs Kurven zeigen die Verläufe für die IPCC Szenarien Fc1 bis Edh (vgl. IPCC 1999:5). Die orange Kurve ist der Durchschnitt der von Fleming et al. (2007) ausgewerteten Studien AERO2K (UK Civil Aviation Authority), AEDT/SAGE (US Federal Aviation Administration), AEM (Eurocontrol) und FAST (Global Atmosphere Division des UK Department for Environment, Food and Rural Affairs) von 2000 bis 2025. Keine der vier Studien bezieht den technischen Fortschritt mit ein. Bei 2030 handelt es sich um eigene Schätzungen über den weiteren Verlauf (gestrichelte, orange Linien). Gezeigt werden zudem die für das LBS und das UBS angenommene Kohlendioxidhöhe bzw. der Kohlendioxidhöhenbereich (graue Fläche). (Quelle: Modifiziert nach IPCC 1999:197, ergänzt durch Fleming et al. 2007:8)

und künstlich erzeugten Zirruswolken klärt. Die Ergebnisse belegen zweifelsfrei, dass allein die wolkeninduzierten bzw. -verändernden Effekte den bis dahin angenommen Gesamtstrahlungsantrieb der Luftfahrt überschreiten (vgl. Abb. 2.7. in Kapitel zwei). In Kombination mit der stark zunehmenden Kohlenstoffdioxidentwicklung der Luftfahrt (Abb. 3.3.), die bis dahin mit Blick auf die Weltwirtschaft als notwendiges Übel hingenommen wurde, schnellte der luftfahrtbedingte Anteil am anthropogenen Strahlungsantrieb in die Höhe.

Mit 22 bis 24 Prozent liegt er auf einem Niveau, welches zuvor noch für unmöglich gehalten wurde (vgl. Abb. 3.4. in folgendem Abschnitt).

Die beschriebene Faktorenkonstellation führt zu einer medialen Hetzjagd auf den bis dahin in den Hintergrund gerückten „bedrohlichen Klimakiller“ (Sittig 2008) Luftfahrt. Die Zuspitzung auf den Kampf „Luftfahrt contra Klimawandel“ schafft eine Situation, die die Akteure der Politik und der Luftfahrtindustrie enorm unter Druck setzt (vgl. Abb. 3.1.).

### **3.2. Lower Bound Szenario**

Die Festlegung und Ratifizierung der Treibhausgasreduktionsziele verlaufen im Lower Bound Szenario weitgehend analog zum UBS. Einziger Unterschied ist die Einbeziehung des Luftverkehrs in das Kyoto-Nachfolgeprotokoll, welches für den Verkehrssektor eine deutliche Reduktion der Kohlendioxid- und Stickstoffoxide vorgibt. So darf bis 2020 unter anderem die Zunahme an Kohlendioxidemissionen des Luftverkehrs maximal ein Prozent pro Jahr betragen. Als Reaktion auf diese Vorgabe kommt es verstärkt zur Einführung von Technologien in der Luftfahrt, die den Ausstoß dieser Treibhausgase erheblich mindern.

Die Begriffe Umweltverträglichkeit, Nachhaltigkeit und soziale Gerechtigkeit haben gegenüber dem Beginn des 21. Jahrhunderts an Bedeutung gewonnen.<sup>37</sup> Das weltweite Wirtschaftswachstum steigt jährlich um weniger als zwei Prozent. Die Wachstumsrate des Luftverkehrs liegt nur knapp darüber (siehe Tab. 3.1.).

Im Jahr 2020 zeichnet sich ab, dass das „60-Prozentziel“ erreicht wurde. Auch die Emissionsentwicklung des Luftverkehrs bleibt unter der Vorgabe. Dennoch bleibt das Thema Klimawandel weiterhin präsent. Das Ziel der Treibhausgasreduktion wird bis

---

<sup>37</sup> Denkbare Gründe hierfür wären Nahrungsmittelknappheiten wie in 2008 und eine weitere Verschärfung des Wohlfahrtsgefälles.

2050 auf 80 Prozent verschärft. Der Luftverkehr soll bis 2050 „klimaneutral“ (das heißt ohne Steigerung der Treibhausgasemissionen) wachsen. Aus diesem Grund bleibt der Druck auf die Luftfahrt weiter bestehen.

Zu Beginn des Jahres 2028 stellt das IPCC fest, dass die Klimaerwärmung mit 1,2 Grad Celsius deutlich geringer ausfällt als zuvor angenommen (Abb. 3.2.). Parallel veröffentlicht das DLR eine neue Studie zum luftfahrtinduzierten Strahlungsantrieb.

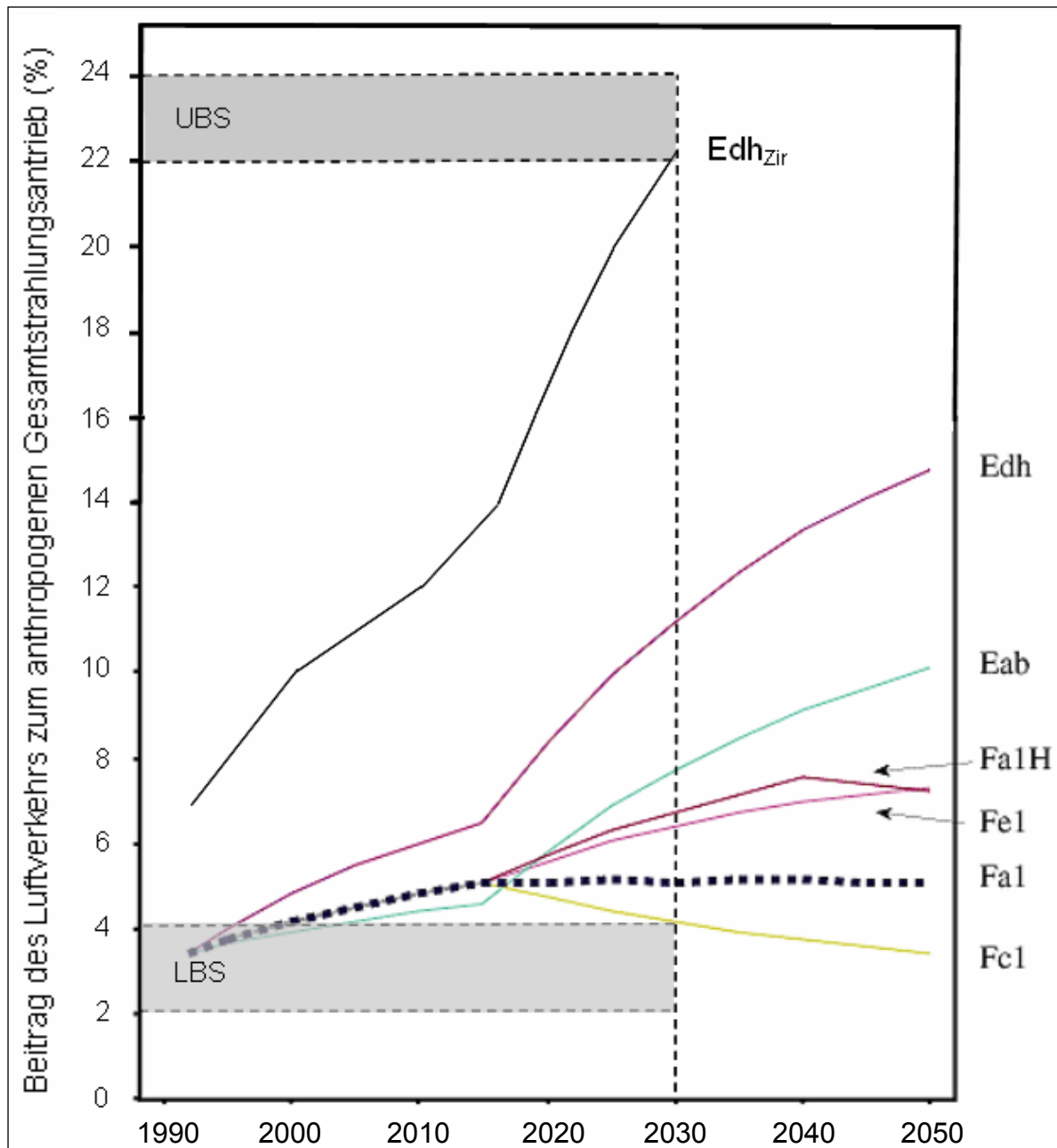


Abb. 3.4.: Entwicklung und Prognose des Luftverkehrsbeitrags zum anthropogenen Gesamtstrahlungsantrieb. Die unteren sechs Kurven zeigen die Verläufe für die IPCC Szenarien Fc1 bis Edh (vgl. IPCC 1999:5). Die obere, schwarze Kurve basiert auf dem Edh Szenario, ergänzt um einen möglichen Effekt durch Zirruswolkenbildung (Edh<sub>Zir</sub>). Gezeigt werden zudem die für das LBS und das UBS angenommenen Prozentbereiche (graue Flächen). (Quelle: Modifiziert nach IPCC 1999:212, ergänzt auf Basis von Sausen et al. 2005:556)



Dieser fällt erheblich geringer aus, da der wolkeninduzierte bzw. -verändernde Effekte sich als schwächer erweist als noch 2005 vermutet (siehe Abb. 3.4.).

Die neuen Erkenntnisse sowie die erfolgreichen Umweltbemühungen der Luftfahrt bringen die Branche 2030 in eine Position, in der sie kaum externem Druck ausgesetzt ist.

#### **4. Ansätze zur Reduzierung der Klimawirksamkeit der globalen Zivilluftfahrt**

Über eine akzentuierte Betrachtung der einzelnen Unterthemen wird in Kapitel vier der Versuch unternommen, sich der Vielschichtigkeit und Komplexität der Gesamthematik zu nähern. Jedem Unterthema wird dabei ein Hauptabschnitt gewidmet, wobei die operativen und strategischen Ansätze aufgrund ihrer eingeschränkten Potenz und thematischen Verwandtschaft zu einem Hauptabschnitt (4.2.) zusammengefasst werden. Dagegen wird die Neuordnung der Luftrauminfrastruktur als ein Ansatz zur Verringerung der Klimawirksamkeit anhand eines Beispiels genauer beleuchtet (4.3.). Das Projekt „Single European Sky“ zeigt welche Probleme bei der Umstrukturierung eines internationalen Luftraums auftreten können und wie mögliche Lösungen hierzu aussehen (ebd.). Durch 4.3. für die territorialen Empfindlichkeiten sensibilisiert, thematisiert anschließend Hauptabschnitt 4.4. die zentralen politischen Instrumente, die auf eine Reduzierung der Klimawirksamkeit der Luftfahrt abzielen. In diesem Zusammenhang wird insbesondere die Aufnahme des Luftverkehrs in das europäische Emissionshandelssystem näher diskutiert. Um die Effektivität der politischen Instrumente sowie die Relevanz der genannten Ansätze (4.2. und 4.3.) bewerten zu können, ist ein Grundverständnis für die zukünftige technische Entwicklung des Flugzeugs von elementarer Wichtigkeit. Aus diesem Grund wird die Betrachtung der technischen Seite (4.1.) den übrigen Ansätzen voran gestellt. Für den technischen Fortschritt hat der Beirat für Aeronautische Forschung in Europa (Advisory Council For Aeronautics Research in Europe, folgend ACARE genannt) konkrete Ziele formuliert, um das Wachstum des europäischen Luftverkehrs trotz der erwarteten Verkehrszunahme (vgl. Kapitel zwei) nachhaltig zu gestalten und damit dem

ausgerufenen „Age of Sustainable Growth“ (ACARE 2002a:3) Rechnung zu tragen.<sup>38</sup> Folgende umweltrelevante Ziele wurden identifiziert: Reduzierung der Kohlendioxid- und Stickoxidemissionen um 50 bzw. 80 Prozent (gemessen pro Sitz und km) bei neuen Flugzeugen bis 2020 (gegenüber einem Basiswert von 2000). Parallel soll zudem das wahrnehmbare Geräuschniveau halbiert werden. Zur Erreichung des Kohlendioxidreduktionszieles, soll der „Airframe“ (siehe 4.1.3.) 20 bis 25 Prozent, die Triebwerke 15 bis 20 Prozent und das Luftverkehrsmanagement („Air Traffic Management“) fünf bis zehn Prozent beitragen. Die gesetzten Emissions- bzw. Geräuschreduktionsziele können als ambitioniert betrachtet werden, da Technologien, die bis 2020 eingeführt werden sollen bereits fünf Jahre zuvor fertig entwickelt sein müssen (ACARE 2002b:71). Um dies zu erreichen müsste die historische Verbesserungsrate verdoppelt werden (SBAC 2008a:1). Dessen war sich der ACARE während der Formulierung der Ziele 2002 bewusst. „The objectives are not achievable without important breakthroughs, in both technology and in concepts of operation – evolutions of current concepts will not be sufficient“ (ACARE 2002a:52). Die Hauptabschnitte 4.1. und im Hinblick auf das Luftverkehrsmanagement auch 4.3. beschäftigen sich mit den genannten Aspekten der ACARE Emissionsreduktionsziele. Das Zwischenfazit (4.5.) dieses Kapitels führt die gewonnen Erkenntnisse zusammen und beurteilt, wie wahrscheinlich die Erreichung der Gesamtziele (Halbierung der Kohlendioxidemissionen und Stickoxidemissionen minus 80 Prozent) ist. Zudem soll offen gelegt werden welche Abhängigkeiten und Implikationen insbesondere zwischen den technischen und politischen Ansätzen bestehen. Weiter geht das Zwischenfazit auf jene Erkenntnisse ein, die unter Anwendung der Szenarienperspektive gewonnen werden konnten.

## **4.1. Technische Ansätze**

Die Intension des Hauptabschnitts 4.1. besteht einerseits darin, die derzeit wichtigsten technischen Ansätze zur Reduzierung der Klimawirksamkeit eines Flugzeugs darzustellen. Andererseits soll aufgezeigt werden, welche Emissionseinsparungen zukünftig von der Technik zu erwarten sind. Laut dem ACARE bieten die Triebwerke und der Airframe die größten Einsparungspotenziale.

---

<sup>38</sup> Der ACARE besteht aus rund 40 Mitgliedern, zu denen überwiegend Vertreter der EU-Mitgliedsstaaten, der Europäischen Kommission, der Industrie (Hersteller, Flugverkehrsgesellschaften, Serviceanbieter) und Forschungseinrichtungen zählen (ACARE 2008).

Die Erreichung der hiermit verbundenen Reduktionsziele (siehe Einleitung Kapitel vier) wird in 4.1.1. und 4.1.3. thematisiert. Unter 4.1.3. wird zudem ein Blick auf ein mögliches Nachfolgerkonzept für das bestehende Flugzeugdesign geworfen. Auf die Behandlung der alternativen Treibstoffe (4.1.2.) wurde besonderes Augenmerk gelegt, da sich hier auf längere Sicht möglicherweise das größte Potenzial ergibt, die Klimabelastung des Luftverkehrs zu minimieren. Wie in Kapitel drei angekündigt, wird versucht, jeweils am Ende eines Unterabschnitts den Erkenntnisgewinn durch den Einsatz der Szenarienperspektive zu erweitern.

#### **4.1.1. Innovative Triebwerkskonzepte**

In der Einleitung zu Kapitel vier wurde das ACARE Ziel, die Senkung der Kohlendioxid- und Stickoxidemissionen um 50 bzw. 80 Prozent bei gleichzeitiger Halbierung des Geräuschniveaus bis 2020, eingeführt. Ebenso wurde erwähnt, dass Innovationen im Bereich der Triebwerksentwicklung einen Reduktionsbeitrag von 15 bis 20 Prozent zur Erreichung dieses Kohlendioxidziels leisten sollen (ACARE 2002a:21). Das Stickoxidreduktionsziel kann ausschließlich über Innovation im Triebwerk erfolgen (ACARE 2002b:95). Folgend soll eingeschätzt werden, ob der Getriebefan und der Propfan als die derzeit aussichtsreichsten Triebwerkskonzepte, diesen Erwartungen gerecht werden können. Dazu werden zunächst die bisherige Entwicklung sowie die grundlegende Funktionsweise von Strahltriebwerken grob skizziert. Dies ist notwendig, um ein generelles Verständnis zu schaffen und darauf aufbauend die oben genannten Konzepte hinsichtlich ihrer Potenziale und Zielkonflikte zu erläutern.<sup>39</sup>

Wie unter 2.1.3. (Verbrennungsprodukte der Luftfahrt) angeführt, erzielte die Luftfahrtindustrie seit den sechziger Jahren eine Steigerung der Treibstoffeffizienz von ungefähr 70 Prozent. Etwa zwei Drittel der realisierten Effizienzsteigerung sind auf Verbesserungen der Triebwerke zurückzuführen (Brich 2000:347). „Das Triebwerk ist der Innovationsträger des Flugzeuges“ (Reske im Expertengespräch, vgl. Anhang B). An der grundlegenden Funktionsweise der Strahltriebwerke (auch Jettriebwerke genannt) hat sich seit deren Einführung in der Zivilluftfahrt vor rund 60 Jahren nichts geändert. Vereinfacht ausgedrückt wird ein Luftstrom erzeugt und

---

<sup>39</sup> Auf eine Detailbehandlung der technischen Aspekte wird weitgehend verzichtet, da diese weder im Sinne einer geographischen Arbeit liegt noch in ausreichender Form vom Autor geleistet werden kann. Zur näheren Vertiefung wird an den jeweiligen Stellen auf weiterführende Literatur verwiesen.

beschleunigt, der beim Austritt aus dem Triebwerk durch das Rückstoßprinzip für Vortrieb sorgt (Grieb 2004:10ff.). Bei der heutigen Anwendung dieses Prinzips lässt sich zwischen dem Turbofan und dem Turboprop unterscheiden.

Ersterer ist die heute dominierende Form der Strahltriebwerke in der Luftfahrt (DLR 2008a). Beim Turbofan saugt ein Schaufelrad (der Fan) Umgebungsluft ein und komprimiert diese. Der dadurch entstandene Luftstrom wird zu einem Teil durch einen Turbokompressor weiter verdichtet und in die Brennkammer (innerer Strom) geleitet und zu einem anderen Teil (äußerer Strom) an diesen vorbei geleitet (ebd.).<sup>40</sup> Das Verhältnis des äußeren zum inneren Luftstrom wird als Nebenstromverhältnis (bypassratio) bezeichnet (Bauerfeind 1999:11). Der innere Strom wird unter Zufuhr von Treibstoff in der Brennkammer entzündet und beschleunigt. Anschließend passiert das Gas eine Turbine, die sowohl den Turbokompressor als auch den Fan antreibt. In der Schubdüse werden innerer und äußerer Strom zusammengeführt und unter erneuter Erhöhung der Strömungsgeschwindigkeit ausgestoßen. Der dadurch erzeugte Rückstoß bewirkt den Vortrieb des Flugzeugs (DLR 2008a).

Die Schubentwicklung des Abgasstroms spielt bei einem Turboprop betriebenen Flugzeug dagegen eine untergeordnete Rolle. Ein Propeller übernimmt bei Turboprop Triebwerken die duale Funktion des Antriebs und der Luftzufuhr (DGLR 2008). Abgesehen von dem hinter dem Propeller gelagerten Getriebe gleicht der Aufbau bzw. die Funktionsweise des Turboprops jedoch im Wesentlichen der des

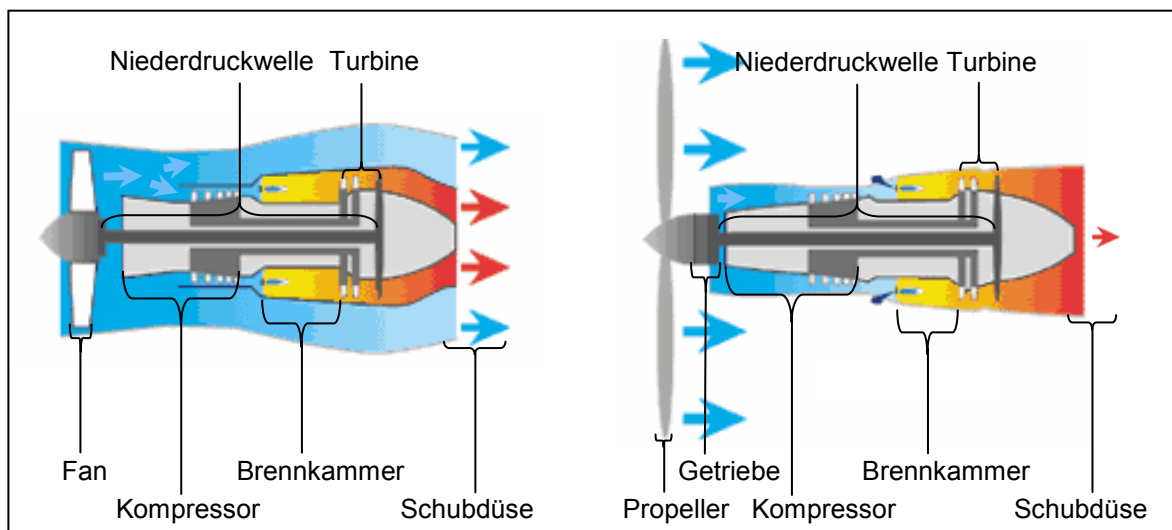


Abb. 4.1.: Schematischer Vergleich von Turbofan und Turboprop. (Quelle: Nach Aerospaceweb 2008, überarbeitet und ergänzt um Beschriftung)

<sup>40</sup> Der Turbofan wird auch als Zweistromtriebwerk bezeichnet, um es von seinem Vorgänger, dem Turbojet, abzugrenzen. Bei Turbojettriebwerken passiert der vollständige Luftstrom die Brennkammer (Bräunling 2001:13).

Turbofans (siehe Abb. 4.1.). Sowohl der Turbofan als auch der Turbo-prop erreichen mittlerweile einen Vortriebwirkungsgrad von 70 bis 80 Prozent (Gmelin et al. 2008:1).<sup>41</sup>

Aufgrund der bauartspezifischen Stärken und Schwächen finden die beiden Triebwerksarten unterschiedliche Anwendungen. Der Turbo-prop erweist sich besonders bei niedriger Geschwindigkeit und einer Flughöhe bis acht km als sehr wirtschaftlich (DGLR 2008). In größeren Höhen ergeben sich dagegen zunehmend physikalisch bedingte Effizienzverlust, da hier der sinkende Luftdruck zu einer verringerten Wirksamkeit des Propellers führt (Bräunling 2004:60). Zum Einsatz kommt der Turbo-prop daher besonders auf der Kurz- bis Mittelstrecke (Farokhi 2008:209ff.). Auf längeren Strecken und in größerer Höhe (ab ca. acht km) dominiert der Einsatz des Turbofans.<sup>42</sup>

Um dessen Treibstoffeffizienz zu steigern, gilt es auf die folgenden drei, eng korrelierten Größen: Widerstand, Triebwerksgewicht und spezifischer Treibstoffverbrauch gezielt Einfluss zu nehmen (Gmelin et al. 2008:20). Während Erstere im Wesentlichen von der Größe des Fandurchmessers abhängen, wird der spezifische Treibstoffverbrauch (specific fuel consumption, kurz SFC) durch ein komplexeres Zusammenspiel dreier Faktoren bestimmt. Das Gesamtdruckverhältnis (overall pressure ratio), die Turbineneintrittstemperatur (turbine entry temperature) sowie das Nebenstromverhältnis (siehe oben) bedingen das Verhältnis von verbrauchtem Kraftstoff zu erzeugtem Schub, woraus sich der spezifische Treibstoffverbrauch ergibt (Gmelin et al. 2008:21). Dieser wurde bisher im Wesentlichen durch eine Erhöhung des Nebenstromverhältnisses gesenkt. Abbildung 4.2. zeigt diese Entwicklung exemplarisch anhand einiger Turbotriebwerksgenerationen. Für die aktuelle Generation erweist sich ein Nebenstromverhältnis von acht bis neun als optimal (Eury 2005:5). Es wurde damit ein Niveau erreicht, dessen weitere Steigerung nur mit deutlichen Negativfolgen für die Gesamteffizienz des Triebwerks erzielt werden kann. Zurückzuführen ist dies auf die Tatsache, dass ein Nebenstromverhältnis von zehn und darüber nur mit einer Reduzierung der Fanggeschwindigkeit erreicht werden kann (Farokhi 2008:121).

---

<sup>41</sup> Der Vortriebwirkungsgrad drückt aus, zu welchem Anteil die vom Kerntriebwerk für den Vortrieb verfügbare Energie in Schub umgesetzt wird (Bräunling 2004:69). Das Kerntriebwerk besteht aus Kompressor, Brennkammer und Turbine (vgl. Abb. 4.1.).

<sup>42</sup> Zum Leistungsspektrum des Turbofans siehe Farokhi 2008:179ff.

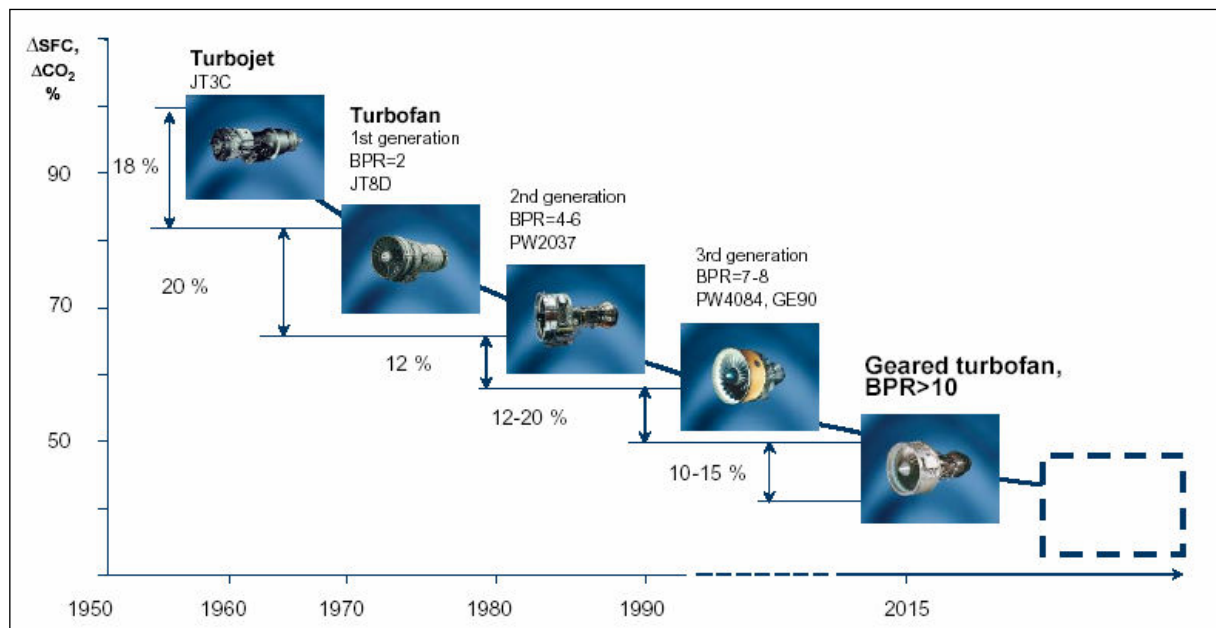


Abb. 4.2.: Entwicklung und Prognose des spezifischen Treibstoffverbrauchs (SFC) und des Nebenstromverhältnisses (BPR) am Beispiel verschiedener Turbotriebwerksgenerationen. (Quelle: Aus Martens 2007:69)

Da der Fan über die Niederdruckwelle mit der Niederdruckturbine verbunden ist, wären eine parallele Verringerung der Turbinengeschwindigkeit und damit einhergehende Effizienzverluste, nicht zu vermeiden (vgl. Abb. 4.1.). Eine Verlangsamung der Niederdruckturbine könnte durch zusätzliche Turbinenstufen kompensiert werden. Die Erweiterung der Turbine hätte jedoch sowohl Längen- als auch Gewichtszuwächse zur Folge (Plohr et al. 2006:5). Eine mögliche Lösung dieses Zielkonflikts (Erhöhung des Nebenstromverhältnisses versus Gewichtszunahme) könnte zukünftig der Getriebefan („Geared Turbofan“) bieten (siehe Abb. 4.3.). Indem der Fan von der Turbine durch ein Übersetzungsgetriebe entkoppelt wird, lässt sich eine verlangsamte Fanggeschwindigkeit bei gleichbleibender bzw. gesteigerter Turbinendrehzahl realisieren.<sup>43</sup> Im Vergleich zu Turbofans ohne Getriebeübersetzung (Abb. 4.1.) lassen sich durch die optimierte Turbinendrehzahl zudem Turbinenstufen und damit Gewicht einsparen. Die Gewichtseinsparung wird jedoch durch die schwerere Niederdruckturbine und die gesteigerte Gesamtkomplexität der Bauweise überkompensiert (Arps et al. 2006:108).<sup>44</sup>

<sup>43</sup> Bereits ein Übersetzungsverhältnis von etwa drei ermöglicht Nebenstromverhältnisse von deutlich über zehn (Gmelin et al. 2008:31).

<sup>44</sup> Der gesamte Gewichtszuwachs beträgt etwa acht bis zehn Prozent (ebd.).

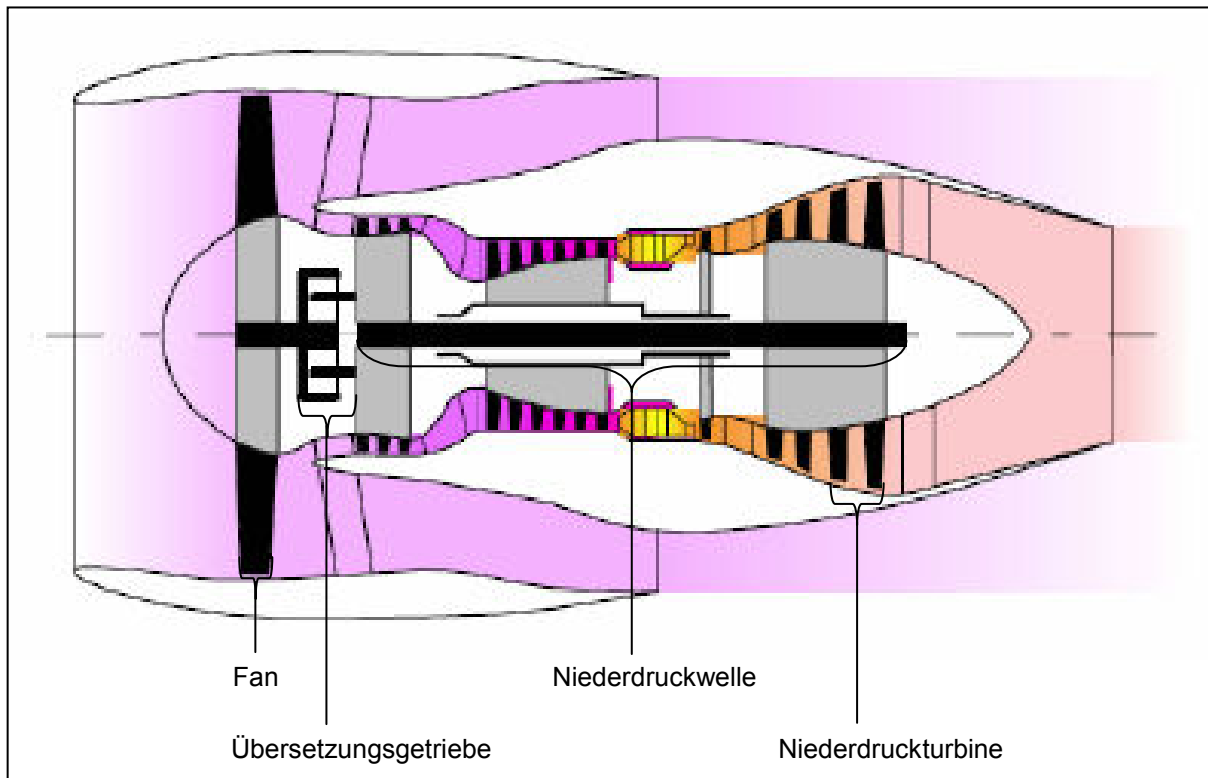


Abb. 4.3.: Schematische Darstellung des Getriebefans. (Quelle: Nach Kurzke 2008 ergänzt um Beschriftung)

Insgesamt lässt sich der spezifische Treibstoffverbrauch um etwa sechs bis zehn Prozent gegenüber dem heutigen Standard senken (ebd.). Der Triebwerkshersteller MTU Aero Engines geht gar davon aus, dass der Getriebefan bis 2015 eine Kohlendioxideinsparung von 15 Prozent erreichen wird (gegenüber dem Referenztriebwerk V2500 von 2005, vgl. Abb. 4.2.). Konkrete Angaben für eine erwartete Stickoxidreduktion liegen seitens der MTU bislang nicht vor. Bekannt ist, dass sich der Getriebefan für den Einsatz einer auf Stickoxidreduktion abgestimmten Brennkammer eignet (Arps et al. 2006:108).<sup>45</sup> Da diese im Vergleich zu herkömmlichen Brennkammern ein höheres Gewicht aufweist, ergibt sich hieraus jedoch ein weiterer Zielkonflikt zwischen Stickoxidreduktion und Treibstoff- bzw. Kohlendioxidsenkung (siehe hierzu ausführlich Plohr et al. 2006, Otten et al. 2006 sowie Hemmer et al. 2007). Aufgrund thermisch bedingter Hürden, die mit steigender Flughöhe zunehmen, eignet sich der Getriebefan vor allem für zukünftige Kurz- bis Mittelstreckenflugzeuge (MTU Aero Engines 2006 und Gmelin et al. 2008:32). Angesichts dessen ist es erstaunlich, dass der erste Testflug des Getriebefans (im Sommer 2008) mit einem Großraumflugzeug des Typs Boeing 747 durchgeführt

<sup>45</sup> Diese Brennkammertechnologie wird als Double Annular Combustor, kurz DAC, bezeichnet. Zum Ursprung der Technologie siehe CFM 1998.

wurde. Ein weiterer Flugtest ist für das vierte Quartal 2008 ebenfalls mit einem Langstreckenflugzeug (Airbus A340) geplant (Henne 2008:80). Nach Auswertung der Testprotokolle wird sich zeigen, ob der Getriebefan auch für Distanzen oberhalb der Mittelstrecke eine Option sein könnte. Für Regionalflugzeuge ist er nach derzeitigem Kenntnisstand in jedem Fall geeignet. Ab 2013 soll der Getriebefan in Flugzeugen von Bombardier (C-Series) und Mitsubishi Heavy Industries (Mitsubishi Regional Jet, kurz MRJ) zum Einsatz kommen (MTU Aero Engines 2008).<sup>46</sup> Derzeit gibt es Anzeichen dafür, dass der Getriebefan zukünftig auch die Kurz- bis Mittelstreckenflugzeuge von Airbus (A320) und Boeing (737) antreiben könnte (siehe Aero 2008a und Flightglobal 2008). Im Expertengespräch bemerkt Bräunling, dass Airbus bisher jedoch zögert, da die Nachfrage der Fluggesellschaften nach dem Getriebefan nicht ausreicht.

Mittel- bis langfristig könnten größere Kohlendioxideinsparungen durch den Einsatz von Propfans erzielt werden, die sich durch ein Nebenstromverhältnis von mindestens 16 auszeichnen (Bräunling 2001:13).<sup>47</sup> Im Unterschied zu klassischen Strahlwerkantrieben (siehe oben) arbeiten die aktuellen Propfanansätze mit zwei gegenläufig rotierenden Propellern bzw. Fans (siehe Abb. 4.4.). Bei diesem bereits in

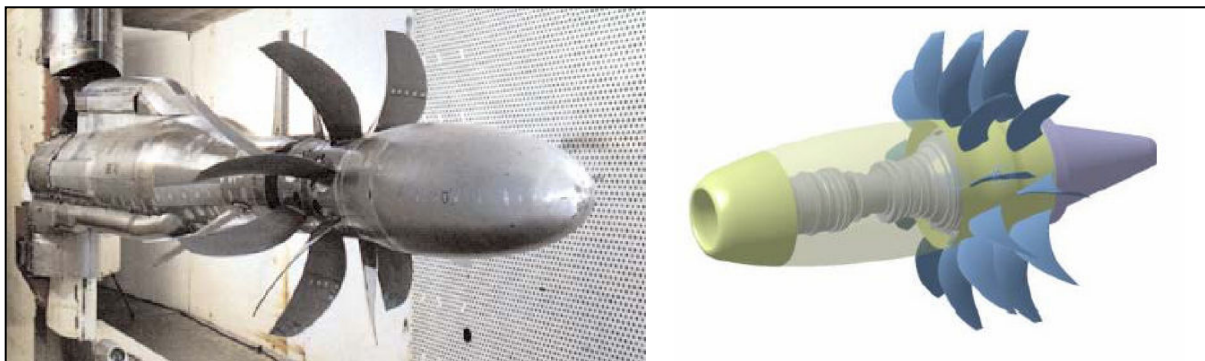


Abb. 4.4.: Aufnahme des Propfans von 1988 und Simulation heute. (Quelle: Eigene Zusammenstellung aus Greener by Design 2007:4 und Rolls Royce 2007:13)

den achtziger Jahren erforschten Prinzip kann der Fanumfang sowie die Fandrehzahl verringert werden, ohne dabei Verluste bei der Beschleunigung des Luftstroms hinnehmen zu müssen (Gmelin et al. 2008:33). Der Propfan findet in ummantelter (ähnlich des Turbofans) oder in offener Form (ähnlich des Turboprops) Anwendung. In der ersten Variante hemmt die Ummantelung die Geräuschentwicklung des Triebwerks, wodurch jedoch die Gesamtleistung aufgrund des zusätzlichen Gewichts

<sup>46</sup> Weitere Ausführungen hierzu finden sich in 4.2.2.

<sup>47</sup> Aufgrund des hohen Nebenstromverhältnisses wird auch vom Superfan- oder Ultra-Hoch-Bypasstriebwerk gesprochen (ebd.).



und Widerstandes gemindert wird (Rüd 2008:15).<sup>48</sup> Dagegen läuft der offene Propfan hinsichtlich des Treibstoffverbrauchs äußerst effizient. Theoretisch kann er einen Vortriebwirkungsgrad (Begriffklärung siehe oben) von bis zu 92,5 Prozent erreichen (Greener by Design 2005:12). Die damit einhergehende höhere Geräuscentwicklung und Gewichtszunahme (durch die nötige Verstärkung des Flügels und des Rumpfes) verhinderte jedoch bisher den breit angelegten Durchbruch dieser Technologie (siehe Plohr et al. 2006:6ff., Arndt 2007:17 und Rüd 2008:15). Im Rahmen des CLAIRE (Clean Air Engine) Programms plant MTU ab 2025 eine 20-prozentige Reduzierung der Kohlenstoffdioxidemissionen gegenüber dem oben genannten Referenztriebwerk durch das CRISP (Counter Rotating Integrated Shrouded Propfan) Triebwerk. Angesichts der Äußerungen von Bräunling, der das Projekt CRSIP in den achtziger Jahren am DLR (Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt) leitete, ergeben sich jedoch Zweifel an den Plänen von MTU. Bräunling bemerkt im Interview über CRISP: „Das Konzept ist bis heute nicht mal näherungsweise irgendwo zu finden. Das heißt wir reden schon von einem Zeitraum von 25 Jahren, in dem das nicht umgesetzt wurde.“ Zudem sei das Lärmemissionsniveau selbst in ummantelter Form „viel zu hoch“ (ebenfalls im Expertengespräch). Nach Bräunlings Meinung ließe sich das CRISP Konzept ohnehin nur sinnvoll in Verbindung mit dem Wärmetauscher realisieren (ebd.). Die Kombination von CRISP und Wärmetauscher soll nach MTU Plänen jedoch erst 2035 erfolgen und eine weitere Kohlendioxidreduktion in Höhe von zehn Prozent ermöglichen (Henne 2008:84).<sup>49</sup>

Unter der Führung von Rolls Royce forscht das DREAM (Validation of Radical Engine Architecture Systems) Projekt seit Anfang 2008 an der Weiterentwicklung der Propfan Technologie (vgl. Rolls Royce 2007).<sup>50</sup> Der Einsatz im Flugverkehr wird, wenn er überhaupt erfolgt, erst mittel- bis langfristig erwartet und sich zudem ebenfalls (wie wahrscheinlich der Getriebefan) auf die Kurz- bis Mittelstrecke

---

<sup>48</sup> Bräunling merkt im Expertengespräch jedoch an, dass die Geräuschkämpfung durch eine Ummantelung hinter den Erwartungen zurück bleibt (vgl. Anhang B).

<sup>49</sup> Dem Wärmetauscher wird eine zunehmende Relevanz bei der Emissionsreduktion zugesprochen, da er unter anderem den Einbau eines DACs (siehe oben) ermöglicht (siehe ausführlich in Boggia und Rüd 2004, Otten et al. 2006 sowie Corchero et al. 2008). Eine nähere Behandlung dieser Komponente würde den Rahmen dieses Abschnitts übersteigen.

<sup>50</sup> Das insgesamt 40 Millionen Euro umfassende Projekt wird durch das siebte Rahmenforschungsprogramm der EU mit 25 Millionen Euro gefördert (Europäische Kommission 2007a:2).

beschränken.<sup>51</sup>

Die Intension der vorangegangenen Diskussion war es, einige zentrale Aspekte der hochkomplexen Triebwerkskonzepte hinsichtlich ihres derzeitigen Stands sowie ihrer weiteren Entwicklung zu beleuchten. Wichtige Zielkonflikte zwischen spezifischem Treibstoffverbrauch und Triebwerksgewicht, zwischen Kohlendioxid- und Stickoxidemissionen sowie zwischen Gesamtemissionshöhe und Geräuschentwicklung wurden identifiziert. Die Antworten, die die Triebwerkshersteller hierauf in Form des Getriebefans bzw. Propfans geben, können bisher nicht überzeugen. Dies liegt zum einen an dem unzureichenden Emissionsreduktionspotenzial der Konzepte und zum anderen an ihrer beschränkten Einsetzbarkeit. Eine Veröffentlichung des Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit, welche das Reduktionspotenzial aktueller Triebwerkskonzepte zusammenfasst, kommt zu dem Schluss, dass „keines der betrachteten Triebwerke in der Simulation die ACARE Ziele für Triebwerke (20 Prozent SFC-Reduktion) erreichen konnte“ (Gmelin et al. 2008:3). Im Hinblick auf die ACARE Ziele kamen Plohr et al. bei ihren Untersuchungen zum Getriebefan und gegenläufigen Propfan zum selben Schluss: „The results reveal that neither the assumed component efficiency improvements nor the improved engine cycles are sufficient“ (Plohr et al. 2006:14). In 2007 simulierten Hemmer et al. die maximale Treibstoffersparnis des effizientesten Triebwerks unter optimalen Bedingungen auf 17 Prozent (2007:1190). Dabei konnten die Stickoxide bei identischem Einsatzprofil (6 000 km) nur unwesentlich (um weniger als zwei Prozent) gesenkt werden bzw. stiegen im ungünstigsten Fall gar um sieben Prozent (Hemmer et al. 2007:1191). Von der Verdoppelung der historischen Verbesserungsrate (Rate of Improvement), die laut Rolls Royce (in Gmelin et al. 2008:14) nötig wäre, um die ACARE Ziele zu erreichen, ist der derzeitige Entwicklungsstand damit weit entfernt (vgl. auch Einleitung zu Kapitel vier). Der angestrebte Beitrag der Triebwerke zum ACARE Kohlendioxid- und Stickoxidreduktionsziel scheint „nicht zu schaffen“ (Bräunling im Expertengespräch) zu sein.

Ab 2013 wird der Getriebefan, die nötige Nachfrage der Fluggesellschaften vorausgesetzt, unter einer weiteren Steigerung des Nebenstromverhältnisses für erste Emissionseinsparungen auf der Kurz- und Mittelstrecke sorgen. Bis dahin wird geklärt sein, ob sich die Technologie eventuell auch für die Langstrecke eignet. Sollte

---

<sup>51</sup> MTU bemerkt zur Technologie der offenen Rotoren: „Entry into service, if ever, would not occur before 2020“ (Henne 2008:86).

sich zeigen, dass dies nicht der Fall ist, ergäbe sich ein erheblicher Mangel an innovativen Triebwerkskonzepten, die eine wesentliche Emissionsreduktion versprechen und gleichzeitig den hohen Leistungsanforderungen der Langstreckenklasse gerecht werden. Der Propfan, der die höchsten Einsparungspotenziale verspricht, ist hinsichtlich seiner Einsetzbarkeit in jedem Fall auf die Kurz- bis Mittelstrecke beschränkt. Seine Einführung ist, sollte sie überhaupt erfolgen, erst nach 2020 zu erwarten.

Anhand der bereits heute realisierten, hohen Wirkungsgrade (siehe oben) zeigt sich, wie stark ausgereift die Turbinentechnologie insgesamt ist. Um hier langfristig signifikante Emissionsreduktionen zu erzielen, müsste entweder der gesamte Flugzeugantrieb radikalen Veränderungen unterzogen werden (vgl. 4.1.3.), alternative Treibstoffe zur Anwendung kommen (siehe nächster Abschnitt) oder eine Verschiebung der Prioritäten zu Lasten des Geräuschniveaus in Kauf genommen werden.

Zu Letzterem könnte es unter dem Upper Bound Szenario (UBS) kommen, welches 2030 von einem starken Druck auf die Luftfahrtindustrie ausgeht, die Klimawirksamkeit des Luftverkehrs deutlich zu senken. Unter diesen Umständen wäre die Einführung des Propfans bedeutend wahrscheinlicher. Denkbar wäre zudem der Einsatz des Getriebefans auf der Langstrecke, wo aufgrund der begrenzten Schubleistung möglicherweise längere Flugzeiten mit Hinblick auf die reduzierte Klimawirksamkeit in Kauf genommen werden müssten.

Neben einer Verschiebung von Prioritäten könnte der hohe Druck des UBS zudem dazu führen, dass radikalere Antriebssysteme entwickelt und zur Marktreife gebracht würden. Die Clean Sky JTI (Joint Technology Initiative), die an der Entwicklung effizienter Technologiedemonstratoren (Integrated Technology Demonstrator, kurz ITD) arbeitet, bemerkt: "If future demands push for more radical solutions to reduce even more aggressively the emissions and noise, the engine ITDs demonstrators would be directed towards radical solutions" (Clean Sky 2008a).<sup>52</sup> Bisher wurde nicht konkretisiert, was genau unter „radical solutions“ zu verstehen ist. Anzunehmen ist, dass es sich hierbei unter anderen um Triebwerke mit gegenläufigen Rotoren wie etwa beim CRISP (siehe oben) handelt.

---

<sup>52</sup> Die Clean Sky JTI ist eins der größten Forschungsprojekte Europas (Laufzeit 2008 bis 2013), dessen Gesamtbudget von 1,6 Milliarden Euro zu gleichen Teilen von der Europäischen Kommission und der Industrie getragen wird (Clean Sky 2008b).

Die Reduzierung der Stickoxidemissionen durch Wassereinspritzung in die Brennkammer, wie sie Bräunling im Expertengespräch anführt (vgl. Anhang B), wäre unter den Annahmen des UBS keine Option, da hier angenommen wird, dass sich die Wasserstoffemissionen als besonders klimarelevant erweisen (vgl. 2.2.2. und 3.1.). Im Gegenteil könnte es intensivierete Bestrebungen geben dem Brennvorgang Flüssigkeit zu entziehen.<sup>53</sup>

Im Falle der Drucksituation des Lower Bound Szenarios (LBS) um 2030, könnte die Einführung des Propfans nahezu ausgeschlossen werden. Es ist kaum anzunehmen, dass eine Fluggesellschaft in eine Technologie investieren würde, die aufgrund ihrer erhöhten Geräusentwicklung zu Akzeptanzproblemen auf Kundenseite stoßen könnte. Darüber hinaus wäre die Einführung von Technologien, die ausschließlich auf eine Emissionsreduktion (beispielsweise von Stickoxid) abzielen und dabei nicht den Treibstoffverbrauch mindern, sehr unwahrscheinlich.

#### **4.1.2. Alternative Treibstoffe**

Seit den Anfängen vor rund 100 Jahren ist die Luftfahrtindustrie in hohem Maße abhängig von Treibstoff auf Rohölbasis (vgl. IATA 2008:3e und 2.1.3.).<sup>54</sup> Die Ablösung des Rohöls als primäre Ressource durch alternative Treibstoffe ist nicht nur kurzfristig aus ökonomischer (vgl. 4.4.1.) und ökologischer (siehe 2.2.) Sicht wünschenswert, sondern angesichts der endlichen Ölreserven langfristig unausweichlich.<sup>55</sup> Folgend wird ein Überblick über mögliche Alternativen zu rohölbasierten Treibstoffen gegeben. Dazu werden zunächst die allgemeinen Anforderungen an ein Ölsubstitut skizziert, um anschließend den Einsatz von Wasserstoff sowie konventioneller Biokraftstoffe und synthetischer Varianten zu diskutieren. Der letzte Teil fasst die thematisierten Punkte kritisch zusammen und gibt unter Berücksichtigung der Szenarienperspektive einen Ausblick über die mögliche zukünftige Entwicklung.

Die Anforderungen an ein geeignetes Substitut für Öl sind hoch. Neben einer geeignet hohen Energiedichte (mindestens 42,8 MJ/kg), die auch für andere

---

<sup>53</sup> In Anfängen werden solche Ansätze bereits diskutiert (siehe Noppel und Singh 2007).

<sup>54</sup> Die Begriffe „Treibstoff“ und „Kraftstoff“ werden in dieser Arbeit synonym verwendet.

<sup>55</sup> British Patrol und das Oil & Gas Journal schätzen die weltweiten Erdölvorkommen für Anfang 2008 auf 1 237,9 Milliarden Barrel (BP 2008:7) bzw. 1 331,7 Milliarden Barrel (Oil & Gas Journal 2007:8). Neueste Berechnungen gehen darauf aufbauend von einer Rohölverfügbarkeit von etwa 30 Jahren aus (siehe Shafiee und Topal 2008:775ff.).

Branchen (beispielsweise die Automobilindustrie) prinzipiell relevant ist, ergeben sich für die Luftfahrt besondere thermodynamische Bedingungen. Am unteren Ende des Temperaturspektrums muss ein ausreichend niedriger Gefrierpunkt gewährleistet werden (ExxonMobil 2008:8).<sup>56</sup> Während bei extrem hohen Temperaturen Ablagerungen im Triebwerk vermieden werden müssen. Über diese sicherheitstechnischen Grundvoraussetzungen hinaus müssen zusätzliche Aspekte berücksichtigt werden. Zum einen gilt es, die Treibhausgasemissionen (siehe 2.1.3.) sowohl beim eigentlichen Verbrauch als auch bei der Betrachtung des gesamten Lebenszyklus (Gewinnung, Verarbeitung, Verbrauch) maximal zu mindern. Bei der Gewinnung und der Weiterverarbeitung dürfen mögliche ökologische (Entwaldung, Biodiversitätsverluste und andere) sowie sozioökonomische Aspekte (Flächennutzungskonflikte und Auswirkungen auf Nahrungsmittelpreise) nicht vernachlässigt werden. Zum anderen muss der Basisrohstoff mittel- bis langfristig in ausreichender Menge und zu einem konkurrenzfähigen Preis verfügbar sein, um ein verlässliches Maß an Planungssicherheit zu bieten. Die Wirtschaftlichkeit einer Treibstoffalternative hängt zudem in erheblichem Maße von nötigen Infrastrukturanpassungen am Boden (zum Beispiel der Betankung) und in der Luft (mögliche Änderungen der Flugstrecken) ab.

Setzt man die Suche nach einer Alternative zum Rohöl bei der Verfügbarkeit des Rohstoffes an, so scheint Wasserstoff, aufgrund seines nahezu unerschöpflichen Vorkommens in Form von Wasser als geeignet (Eichlseder und Klell 2008:27). Zudem weist Wasserstoff mit 120 MJ/kg eine im Vergleich zu Kerosin (siehe oben) knapp dreimal so hohe Energiedichte auf (ebd. 2008:34). Bei der Verbrennung von Wasserstoff entsteht kein Kohlenmonoxid, Kohlendioxid, Schwefeloxid oder Ruß (ICCEPT 2003:23). Hier zeigt sich neben der Verfügbarkeit der größte Vorteil gegenüber der Nutzung von Kerosin (vgl. 2.1.3.). Im Falle eines unkontrollierten Austretens von Treibstoff wäre die Bildung eines Brandteppichs, wie er etwa bei Kerosin entstehen kann, bei Wasserstoff unwahrscheinlicher (ICCEPT 2003:23). Entsprechende Modifikationen und Optimierungen vorausgesetzt, ließe sich die derzeitige Triebwerkstechnologie mit Wasserstoff betreiben (Airbus Deutschland 2003:4).

Erheblich größere Herausforderungen und Nachteile ergeben sich in anderen Bereichen. So wird die höhere Energiedichte durch das hohe spezifische Volumen

---

<sup>56</sup> Bei den in der zivilen Luftfahrt üblichen Kraftstoffen liegt der Gefrierpunkt bei minus 40 Grad Celsius (Typ Jet A) bzw. minus 47 Grad Celsius (Typ Jet A1) (ebd.).

von Wasserstoff überkompensiert. Selbst bei einer Lagerung in flüssiger Form, welche eine Herunterkühlung auf etwa 20 Grad Kelvin (minus 253 Grad Celsius) voraussetzt, fällt das spezifische Volumen zwölfmal höher aus als das von Kerosin (Eichlseder und Klell 2008:34ff.). Um die gleiche Strecke zurück zu legen, müssten die Wasserstofftanks damit etwa viermal größer sein als herkömmliche Kerosintanks. Zudem müssten weitreichende Anpassungen an den Triebwerken und der Form der Tanks vorgenommen werden.<sup>57</sup> Eine Unterbringung der Tanks in den Tragflächen, wie sie heute üblich ist, wäre damit unmöglich. Eine Platzierung des bzw. der Tanks unter, über oder hinter der Kabine hätte weitreichende (überwiegend negative) Konsequenzen für die Aerodynamik der gesamten Flugzeugarchitektur (Airbus Deutschland 2003:10, siehe auch Besprechung der Aerodynamik in 4.2.3.). Die damit einhergehenden Infrastrukturanpassungen am Boden (neue Betankungssysteme, Anpassung der Rollbahnen und Terminals) würden erhebliche Investitionen nötig machen. Unabhängig von der Kostenfrage fällt die Klimawirksamkeitsbilanz von Wasserstoff weniger positiv aus als zunächst oben angenommen. Bei der Verbrennung von Wasserstoff entsteht als Primärprodukt 2,6 mal soviel Wasserdampf wie bei der Verbrennung von Kerosin mit vergleichbarem Energiegehalt (ICCEPT 2003:23). Aufgrund des in der Luft vorhandenen Stickstoffs bildet sich dabei das klimawirksame Stickoxid als Sekundärprodukt. Weiter ist aus Kapitel zwei bekannt, dass der Ausstoß von Wasser auf Reiseflughöhe hinsichtlich der Bildung von Kondensstreifen bzw. künstlichen Zirren nicht unproblematisch ist (siehe hierzu auch Marquart et al. 2005). Um diese zu vermeiden, müssten die Flughöhen gesenkt werden, wodurch die Treibstoffeffizienz als Folge des erhöhten Widerstands gemindert würde (Svensson et al. 2004:307).<sup>58</sup> Insgesamt betrachtet würde die Klimawirksamkeit der Wasserstoffverbrennung gegenüber der heutigen Kerosinvariante dennoch erheblich geringer ausfallen.<sup>59</sup>

Neben der bereits angesprochenen Lagerung von Wasserstoff ist auch die Herstellung nach wie vor energieintensiv. Zwar steht mittlerweile ein vielschichtiges Spektrum an Reformierungs-, Vergasungs- und Spaltungsverfahren zur Herstellung von Wasserstoff zur Verfügung, dennoch hängt die Treibhausgasbilanz des gesamten Lebenszyklus stark davon ab, in wieweit es gelingt, die verschiedenen

---

<sup>57</sup> Für Wasserstofftanks scheint eine Röhrenform geeignet (Airbus Deutschland 2003:8ff.).

<sup>58</sup> Die Vermeidung von flugzeuginduzierter Wolkenbildung wird unter 4.4.2. näher thematisiert.

<sup>59</sup> Ponater et al. gehen davon aus, dass eine Umstellung von Kerosin auf Wasserstoff eine Reduzierung des Strahlungsantriebs (vgl. 2.2.) von etwa 30 Prozent bis 2050 bewirken würde (2006: 6928).

Produktionsverfahren mittels regenerativer Ressourcen zu realisieren (siehe ausführlich Eichlseder und Klell 2008:203ff.).

Anders als in der Automobilindustrie kommt die Wasserstofftechnik als Primärtrieb in der Luftfahrt bisher nicht in größerem Maße zum Einsatz.<sup>60</sup> Bis heute gab es lediglich vereinzelt Flüge auf denen jeweils ein Triebwerk mit Wasserstoff betrieben wurde.<sup>61</sup> Der umfassendste Ansatz zum Thema „Wasserstoffflugzeug“ ist das von der Europäischen Gemeinschaft geförderte Projekt „Cryoplane“. Unter der Leitung von Airbus Deutschland untersuchte ein Konsortium aus 35 Unternehmen, Universitäten und Forschungseinrichtungen den Einsatz von Wasserstoffantrieben im Rahmen einer „overall system analysis“ (European Commission 2004). Zwischen 2000 und 2002 untersuchten die Beteiligten die Eignung von Wasserstoff als Treibstoff für kleinere Regionalflugzeuge bis hin zu dem derzeit größten Passagierflugzeug Airbus A380. Die Autoren der Studie kommen zu dem Fazit, dass sich der Energieverbrauch sowie das maximale Startgewicht durch die größeren Tanks um jeweils neun bis 14 Prozent gegenüber der konventionellen Variante erhöhen würden. Die operativen Kosten würden allein durch den Treibstoff um vier bis fünf Prozent zunehmen (siehe Airbus Deutschland 2003:3).<sup>62</sup> Generell hält die Studie fest: „Use of Liquid Hydrogen to fuel aircraft for commercial airline service is technically feasible. However, there is a need for much more R&D [Research and Development] work to make the technology ready for routine commercial operation“ (Airbus Deutschland 2003:77). Zur praktischen Anwendung kam Wasserstoff seitdem lediglich im Rahmen kleiner unbemannter Modellflugkörper, die zudem durch Propeller angetrieben wurden.<sup>63</sup>

Um kostenintensive Konzept- und Strukturanpassungen, wie sie die Wasserstofftechnik notwendig macht, zu vermeiden, lässt sich die Praktikabilität als Ausgangspunkt für die Suche nach einem klimaverträglichen Rohölsubstitut wählen. Dieser Ansatz fokussiert die Verwendung von herkömmlichen Biokraftstoffen, die üblicherweise nach ihrer Umweltverträglichkeit sowie ihrer biologischen Basis in drei Generationen unterteilt werden (IATA 2008g).

---

<sup>60</sup> Zur Anwendung in der Automobilindustrie siehe Eichlseder und Klell 2008:226ff.

<sup>61</sup> Als erste flog 1956 eine USAF B57 mit Wasserstoff. Später folgten weitere Versuche, darunter 1989 eine Tupolev TU154, die wahlweise ein Triebwerk mit Wasserstoff oder Flüssiggas betreiben konnte (ICCEPT 2003:23).

<sup>62</sup> Angaben zu der Entwicklungs-, Anschaffungs- und Anpassungskosten der Infrastruktur wurden nicht gemacht.

<sup>63</sup> Das Deutsche Zentrum für Luft und Raumfahrt (DLR) führte 2007 einen Testflug mit dem fünf kg schweren Wasserstoffmodellflugzeug „HYfish“ durch (DLR 2007). Zuvor gab es Testflüge mit etwas größeren Modellen (15 Meter Flügelspanne) in den USA (BBC 2005).

Die Biokraftstoffe der ersten Generation werden überwiegend aus den Ölen, Stärken, Fetten und Zuckern landwirtschaftlicher Produkte gewonnen (siehe Mastny 2007:19ff.). Durch den Einsatz herkömmlicher Verfahren (Gehung, Veresterung und anderen) hat die Produktion dieser Treibstoffe in den USA (aus Mais), Brasilien (aus Zuckerrohr), und Europa (aus Weizen und Zuckerrüben) bereits großtechnisches Niveau erreicht (Bernhardt 2006:5, EIA 2007, Kammer 2007 und Biofuels Research Advisory Council 2006).<sup>64</sup> In der Automobilindustrie konnten sich Biokraftstoffe aufgrund ihrer breiten Verfügbarkeit, wirtschaftlichen Konkurrenzfähigkeit und politischen Flankierung, in Europa bereits etablieren (Europäische Kommission 2007b). Für die Luftfahrtindustrie kommt der Einsatz von Biodiesel oder Ethanol maximal als Beimischung („blending“) zu bestehenden Kraftstoffen in Frage, da die Energiedichte (zwischen 26 und 36 MJ/kg) prinzipiell zu gering ist.<sup>65</sup> Zudem erweist sich der geringe Zündpunkt (12 Grad Celsius) von Ethanol aus Sicherheitsgründen als nicht unproblematisch (ICCEPT 2003:23). Dass der Einsatz generell möglich ist, zeigte ein Testflug der Fluggesellschaft Virgin Atlantic Anfang 2008. Auf der Strecke London-Amsterdam wurde eins der Boeing 747-400 Triebwerke mit einer Mischung aus Bassum- und Kokosöl betrieben (Virgin Atlantic 2008a und 2008b, siehe auch Der Spiegel 2008a). Spezifikationen für eine allgemeine Zulassung von Biokraftstoff als Flugzeugtreibstoff existieren bisher nicht (IATA 2008g). Abgesehen davon geraten die Biokraftstoffe der ersten Generation zunehmend wegen ihres geringen bis mittleren Treibhausgaseinsparungspotenzials während der eigentlichen Nutzung sowie ihrer Herstellung in die Kritik (vgl. Kerckow 2007). Der Anbau der meisten Agrarpflanzen wird als zu grundwasser- und düngemittelintensiv bezeichnet (siehe World Bank 2007:16 und 2007:40). Vor allem aufgrund der preissteigernden Wirkung auf landwirtschaftliche Nahrungsmittel, fordern die Vereinten Nationen hier mittlerweile ein verstärktes Umdenken (United Nations 2008).<sup>66</sup>

Eine mögliche Lösung könnte eine intensiviertere Förderung der Biotreibstoffe zweiter Generation sein. Zu dieser Generation zählt man Kraftstoffe, die im Gegensatz zur

---

<sup>64</sup> Der Ethanol- und Biodieselmärkte ist hoch konzentriert. Laut Weltbank wurde die weltweite Ethanol Produktion (40 Milliarden Liter) 2006 zu 46 Prozent von den USA, zu 42 Prozent von Brasilien, zu vier Prozent von der Europäischen Union und zu acht Prozent von übrigen Ländern erbracht. Die Biodieselproduktion (6,5 Milliarden Liter) stammte 2006 zu 75 Prozent aus der Europäischen Union (überwiegend aus Deutschland und Frankreich) sowie zu 13 Prozent aus den USA und weiteren Ländern (12 Prozent) (World Bank 2007:70).

<sup>65</sup> Zur Detailübersicht der verschiedenen Ether siehe Schmitz 2003:157.

<sup>66</sup> Sie kritisierten, dass Europa und die USA einen „criminal path“ (United Nations 2008) bei der Biotreibstoffproduktion eingeschlagen hätten. Laut dem International Monetary Fund (IMF) ist die Biokraftstoffproduktion weltweit für etwa 40 bis 70 Prozent der Preissteigerung für Agrarprodukte verantwortlich (IMF 2008c).



ersten Generation nicht nur Teile sondern die gesamte Pflanze zur Herstellung von Treibstoff verwenden (UBA 2007b). Neben landwirtschaftlichen Reststoffen können Biotreibstoffe der zweiten Generation auch aus forstwirtschaftlichen (Sägespäne) und industriellen Restprodukten (zum Beispiel aus der Schwarzlauge der Papierindustrie) hergestellt werden (Europäische Kommission 2007b:2 und IATA 2008f). Über den gesamten Lebenszyklus betrachtet ließe sich so neben der sozioökonomischen (verminderte Konkurrenz zur Nahrungsmittelproduktion) auch die ökologische Nachhaltigkeit deutlich verbessern. In der Luftfahrt kam der Biokraftstoff der zweiten Generation bisher noch nicht zum Einsatz. Japan Airlines hat jedoch einen Test mit einer Boeing 747-300 für Anfang 2009 angekündigt (JAL 2008).<sup>67</sup> Inwieweit eine ausreichende Energiedichte durch verbesserte Verfahren und eine ausreichende Versorgung zu realisieren sein wird, lässt sich zum heutigen Zeitpunkt nicht einschätzen.

Die dritte Generation der Biokraftstoffe wird vollständig aus nahrungsmittelfernen Pflanzen und Algen erzeugt. Vor allem Algen beinhalten „significantly more energy per acre than its closest biofuel competitors“ (New Mexico Institute of Mining and Technology 2008). Konkret wird von einer um 30- bis 100-fach erhöhten Produktivität ausgegangen (US Department of Energy Efficiency and Renewable Energy 2007). Die Universität von Virginia, welche hierzu eine intensive Forschung betreibt, nennt eine um 15 Prozent erhöhte Ölproduktion aus Algen gegenüber Mais (University of Virginia 2008).<sup>68</sup> Zudem lassen sich Algen und Pflanzen wie zum Beispiel Halophyten (Salzpflanzen) vor allem dort anbauen, wo die Bodenqualität die Bewirtschaftung mit Nahrungsmittelpflanzen nicht zulässt. Weitere Vorteile ergeben sich durch einen geringen Düngungs- und Bewässerungsaufwand (University of Virginia 2008). Die Herstellung von Flugzeugtreibstoff aus Algen befindet sich noch in den Anfängen. Angesichts dessen erscheint es äußerst ambitioniert, dass die Royal Dutch Airline (KLM) bis 2010 zwölf Flugzeuge (sieben Prozent) ihrer Fokker-50 Flotte mit Treibstoff aus Algen zu betreiben plant. Aussichten bestehen, dass zu einem späteren Zeitpunkt die gesamte Fokker-50 Flotte auf diesen Treibstoff umgestellt wird (Radio Netherlands 2008).

Neben Algen hat insbesondere die Purgiernuss, ein bis zu drei Meter hoher Strauch der Pflanzengattung *Jatropha*, in den vergangenen Jahren als potentieller

---

<sup>67</sup> Welche Biomasse dem Testflug zu Grunde liegen wird, wurde noch nicht konkretisiert (ebd.).

<sup>68</sup> Laut IATA haben Algen sogar das Potenzial, etwa 250 mal mehr Öl (pro Flächeneinheit) zu produzieren als Sojabohnen der ersten Generation (2008f).

Kerosinersatz an Bedeutung gewonnen (siehe Jongschaap et al. 2007). Die Samen der Pflanze bestehen zu etwa 35 Prozent aus (unverzehrbarem) Öl hoher Qualität (World Bank 2002). Durch den niedrigen Niederschlagsbedarf (300 Millimeter jährlich) ist sie besonders für den Anbau in trockenen Regionen geeignet (Fuels from Agriculture in Communal Technology Foundation 2007:4). Laut der bisher umfassendsten Jatropha Studie des Global Exchange for Social Investment (GEXSI), beträgt die Anbaufläche weltweit derzeit 936 000 Hektar, die sich auf Asien (85 Prozent), Afrika (13 Prozent) und Lateinamerika (2 Prozent) verteilt (GEXSI 2008:9).<sup>69</sup> Bis 2010 und 2015 wird angenommen, dass die Gesamtfläche auf 4,7 bzw. 12,8 Millionen Hektar ansteigt (GEXSI 2008:10). In der Luftfahrtindustrie stößt diese Entwicklung zunehmend auf Interesse. Der Vorstandsvorsitzende von New Zealand Airlines, Rob Fyfe, bemerkt hierzu: „Jatropha satisfies all our criteria and furthermore it is likely to be available in the necessary commercial quantities to meet our needs within five years“ (in Harbison 2008:34). Einen ersten Testflug mit einem Jatropha-Kerosinmix plant die Fluggesellschaft für 2009 mit einer Boeing 737 (Air New Zealand 2008).<sup>70</sup> Continental Airlines hat einen ähnlichen Testflug (ebenfalls mit einer Boeing 737) angekündigt, der möglicherweise auch auf Jatropha basieren wird (Continental Airlines 2008). Über das Treibhausgaseinsparungspotenzial hinaus dürfte für die Fluggesellschaften besonders der mögliche Preisvorteil gegenüber herkömmlichem Kerosin von Bedeutung sein. Ein Analyst von J.P. Morgan schätzt den Marktpreis für Jatropha auf etwa 43 USD pro Barrel (in Los Angeles Times 2008).<sup>71</sup> Es scheint als könnte Jatropha sowohl aus ökonomischer (ausreichende Qualität und Quantität) als auch aus ökologischer (hohes Treibhauseinsparungspotenzial und nachhaltiger Anbau) Sicht mittel- bis langfristig das gesuchte Substitut für Rohöl werden. Hierzu ist jedoch anzumerken, dass sich die Jatropha Forschung noch in ihren Anfängen befindet. „Very few projects are more than two years old and hardly any project can demonstrate significant production of Jatropha oil yet“ (GEXSI 2008:21). Die hohen Erwartungen, die mit der großindustriellen Produktion der Pflanze verbunden sind, basieren überwiegend auf Annahmen und weniger auf fundierter Forschung. Obwohl sich die Pflanze das

---

<sup>69</sup> Im Auftrag des World Wide Fund für Nature (WWF) wurden 176 Experten zu 242 Jatropha Projekten in 55 Ländern befragt (GEXSI 2008:17).

<sup>70</sup> Bis 2013 plant Air New Zealand einen Biokraftstoffanteil am Gesamtverbrauch von mindestens zehn Prozent (ebd.).

<sup>71</sup> Der Preis für ein Barrel Flugkerosin lag 2008 (Januar bis Mitte September) bei 141 USD (IATA 2008h). Zur allgemeinen Wettbewerbsfähigkeit von alternativen Treibstoffen siehe Anderson 2006:8ff.

ganze Jahr über und zudem auf sehr nährstoffarmen Böden anbauen lässt, wird es bis zu fünf Jahre dauern, bis sich eine optimale Ernte erzielen lassen wird (J.P. Morgan 2007:24). Rechnet man die übrigen Schritte wie die Weiterverarbeitung und den Verkauf hinzu, werden 10 bis 15 Jahre vergehen, bevor *Jatropha* einen signifikanten Einfluss auf den Biodieselmärkte haben wird (ebd.). GEXSI bemerkt, dass es beim Anbau von *Jatropha* durchaus zu „trade-offs“ (2008:13) zwischen der Rehabilitation von Ödland und einer maximalen Ölproduktion kommt. *Jatropha* ist zudem keine domestizierte Industriepflanze, die dadurch in monokultureller Anbauweise für Krankheiten als anfällig gilt (ebd.). Trotz der aufgezeigten Herausforderungen, die bei jeder großflächigen Produktion in verschiedener Ausprägung zu erwarten sind, scheint *Jatropha* derzeit der potentiell stärkste Vertreter der konventionellen Biotreibstoffe dritter Generation zu sein.

Im Unterschied zu den soeben beschriebenen konventionellen Biotreibstoffen werden synthetische Treibstoffe unter Einsatz des Fischer-Tropsch-Verfahrens hergestellt.<sup>72</sup> Bevor das Verfahren angewendet wird, muss das Ausgangsmaterial unter Einsatz verschiedener Vergasungsverfahren auf molekulare Ebene herunter gebrochen werden (ebd. 2008:30). Das dabei entstehende Gemisch aus Kohlenmonoxid und Wasserstoff wird dann durch das Fischer-Tropsch-Verfahren zu Kohlenwasserstoff verflüssigt (Fischer und Tropsch 1926). Auf diese Weise lässt sich gezielt ein hochreiner Kraftstoff mit bestimmten Siedelagen und Zündeigenschaften designen. Daraus ergibt sich eine nahezu 100-prozentige Kompatibilität mit der bestehenden Triebwerktechnik und den übrigen Flugzeugkomponenten (ICCEPT 2003:21). Je nachdem welches Ausgangsmaterial gewählt wird, unterscheidet man zwischen CtL (Coal to Liquid), GtL (Gas to Liquid) und BtL (Biomass to Liquid).<sup>73</sup> Zu der umfassenden Kontrolle der Eigenschaften des synthetischen Treibstoffs kommen im Falle von CtL und GtL eine gesicherte Verfügbarkeit von etwa 70 bzw. 200 Jahren hinzu (Shafiee und Topal 2008:775ff.).<sup>74</sup> Von allen rohölfernen Varianten sind CtL und GtL am stärksten im weltweiten Flugverkehr integriert. Bereits seit neun Jahren werden Flugzeuge am internationalen Flughafen von Johannesburg mit Kerosin betankt, das bis zur Hälfte aus CtL des südafrikanischen Unternehmens Sasol

---

<sup>72</sup> Daher wird teilweise auch von „Fischer-Tropsch-Kraftstoffen“ gesprochen (Braun-Unkhoff und Le Clercq 2008:29).

<sup>73</sup> Der Anhang „to Liquid“ bezieht sich auf die Verflüssigung während des Verfahrens. Die Kurzformen CtL, GtL und BtL haben sich im deutschen Sprachraum etabliert und werden daher auch hier verwendet (siehe beispielsweise UBA 2007b, Europäische Kommission 2007b, BMBF 2008, Braun-Unkhoff und Le Clercq 2008).

<sup>74</sup> Ausgehend von den bekannten Vorkommen und einer konstanten Konsumrate von 2006 (ebd.).

besteht (Sasol 2008a). Im April 2008 erhielt das Unternehmen die weltweit erste Zulassung für CtL als vollwertiges Substitut für herkömmliches Kerosin (ebd.). Das Unternehmen plant sowohl die CtL- als auch die GtL-Produktion massiv auszubauen.<sup>75</sup> Dass auch GtL für den Einsatz im Luftverkehr geeignet ist, zeigte ein Airbus Testflug mit einer A380 Anfang 2008. Auf dem Flug von Filton (England) nach Toulouse wurde eines der vier Triebwerke erfolgreich mit GtL betrieben (Airbus 2008a).

Die Vorteile, die CtL und GtL in den Punkten Verfügbarkeit und Reifegrad mit sich bringen, werden durch die negativen Aspekte der Produkte jedoch (bisher) überkompensiert. Die Herstellung ist durch die Anwendung verschiedener Verfahren und Schritte (siehe oben) aufwändig und energieintensiv (IATA 2008g und Frost & Sullivan 2008a).<sup>76</sup> In Kombination mit dem Treibhausgasausstoß während der Verbrennung fällt die Emissionsbilanz von CtL und GtL schlechter aus als die von Rohöl (Tab. 4.1.). Die Einführung emissionsärmerer Produktionsverfahren (zum Beispiel von Kohlenstoffsequestrierung) würde den ohnehin sehr hohen Investitionsaufwand für CtL- und GtL-Anlagen zusätzlich steigern.<sup>77</sup>

Wie hoch der Kostenaufwand für eine vergleichbare BtL Anlage liegen würde, lässt sich zur Zeit nur schwer abschätzen, da der Reifegrad von BtL weit hinter der CtL- und GtL-Entwicklung zurück liegt.<sup>78</sup> Die Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe schätzte 2006, dass BtL bei Produktionskosten von einem Euro pro Liter und einem Rohölpreis von etwa 155 bis 160 USD wirtschaftlich hergestellt werden könnte (2006:31). Umfangreiche BtL-Tests und größere Projekte wurden bisher hauptsächlich von der Automobilindustrie durchgeführt.<sup>79</sup> Das hohe Potenzial von BtL ist jedoch auch von der Luftfahrtindustrie erkannt worden. „Unter ökologischen Aspekten wäre BtL für Lufthansa die beste Alternative“ (Deutsche Lufthansa 2007a:57) bemerkt Haag, Leiter der Abteilung Umweltkonzepte Konzern der Deutschen Lufthansa. Bis 2020 will die Fluggesellschaft ihre Flotte mit bis zu zehn

---

<sup>75</sup> Eine Anlage mit einer Maximalkapazität von 80 000 Barrel CtL pro Tag wird in China erwogen (Sasol 2008b). Die 2007 in Betrieb genommene GtL Anlage in Katar soll zukünftig die Produktion deutlich steigern (Reuters UK 2008). In der GtL-Anlage des ebenfalls südafrikanischen Unternehmens PetroSA lassen sich bereits 36 000 Barrel GtL pro Tag herstellen (PetroSA 2008).

<sup>76</sup> Der Wirkungsgrad bei der Herstellung von CtL und GtL liegt bei etwa 50 bzw. 70 Prozent (Eichseder und Klell 2008:210).

<sup>77</sup> Die Investitionen für CtL- und GtL-Anlagen liegen derzeit etwa doppelt so hoch wie für konventionelle Rohöl-Anlagen (Frost & Sullivan 2008a).

<sup>78</sup> Im April 2008 wurde die „weltweit erste kommerzielle Anlage zur Herstellung von synthetischem Biokraftstoff“ (Choren Industries 2008) in Freiberg eröffnet (ebd.).

<sup>79</sup> Im Rahmen des EU-Projekts RENEW untersuchte Volkswagen beispielsweise den Einsatz und die Eigenschaften von BtL-Kraftstoffen „in Motoren aus der Serienfertigung“ (Volkswagen 2008).

Prozent Biokraftstoff (herkömmliche Biotreibstoffe eingeschlossen) betanken (Deutsche Lufthansa 2008b:2).

Bevor das erhebliche Treibhausgaseinsparungspotenzial von BtL in größerem Umfang ausgeschöpft werden kann, müssen zunächst die zentralen Fragen nach dem genauen Ausgangsmaterial (vgl. Ausgangsstoffe für herkömmliche Biotreibstoffe), dem Produktionsverfahren sowie nach den möglichen operativen Anpassungen, geklärt werden. Tabelle 4.1. fasst die Kernaussagen der bis hier geführten Diskussion zu den verschiedenen Treibstoffalternativen zusammen.<sup>80</sup>

	<b>Treibhausgasemission in %</b>	<b>Gesch. Kosten in \$/Barrel</b>	<b>Quantitative Verfügbarkeit</b>	<b>Auswirkungen auf die Nahrungsmittelproduktion</b>
<b>Herköm. Kerosin</b>	100	166	heute hoch, langfristig begrenzt	<i>keine Angabe</i>
<b>Biotreibstoff erste Generation</b>	60 bis 80	135 bis 200	begrenzt	hoch
<b>Biotreibstoff zweite Generation</b>	unter 60	110 bis 160	mittel	keine bis geringe
<b>Biotreibstoff dritte Generation</b>	0 bis 40	60 bis 130	hoch	keine
<b>Coal-to-Liquid (CtL) und Gas-to-Liquid (GtL)</b>	150 bis 200	130 bis 200	begrenzt	keine
<b>Biomass-to-Liquid (BtL)</b>	40 bis 80	135 bis 200	begrenzt	keine bis geringe

Tab. 4.1.: Alternative Treibstoffe im Vergleich zu herkömmlichem Kerosin. (Quelle: Nach IATA 2008g)

In dem bis heute umfassendsten Dokument zur globalen Luftfahrt „Aviation and the Global Atmosphere“ halten die Autoren 1999 fest: „There would not appear to be any practical alternatives to kerosene-based fuels for commercial jet aircraft for the next several decades“ (IPCC 1999:10). Eine der führenden Atmosphärenforscherinnen und Mitautorin der Studie von 1999, Penner, bestätigt 2001: „No substitute for jet fuel

<sup>80</sup> Angaben zu Wasserstoff wurden nicht aufgeführt, da dessen Einsatz kurz- bis mittelfristig als sehr unwahrscheinlich gilt.

(fossil c) is obvious“ (Penner 2001:21). Heute, sieben Jahre später, ist die Aussage weiterhin gültig.

Die erfolgte Betrachtung der aktuell diskutierten Alternativen zu Rohöl hat gezeigt, dass sich auch heute die potentiell nachhaltigeren Treibstoffe in frühen (Biokraftstoffe der zweiten Generation) bis sehr frühen (Biokraftstoffe der dritten Generation und BtL) Phasen ihrer Entwicklung befinden. Die heute und in absehbarer Zeit am Markt verfügbaren Rohöialternativen bieten nicht die gewünschte Reduktion von Treibhausgasen (Beispiel GtL), übersteigen das bestehende Emissionsniveau (CtL) oder sind aus sozioökonomischen Aspekten (Biokraftstoffe der ersten Generation) untragbar. Angesichts des bestehenden Mangels an rohölfernen Kraftstoffen, entsteht der Eindruck, dass die Luftfahrtindustrie über Jahrzehnte ausschließlich in die Effizienzsteigerung und Optimierung der bestehenden (Triebwerks-)Technik investiert hat. Sicherlich stellt der Luftverkehrssektor besonders hohe Anforderungen an die Grundversorgung seiner Mobilität (siehe oben). Zudem gestaltet sich die Einführung fundamental neuer Technologien auf Grund der Komplexität der Branche (vgl. 4.3.) nicht nur äußerst aufwendig, sondern vor allem riskant.<sup>81</sup> Dennoch hat man es lange verpasst, die relevanten Akteure (Hersteller, Fluggesellschaften und weitere Entscheidungsträger) zusammen zu bringen, um Kollektivlösungen für ein sich abzeichnendes Problem zu erarbeiten. Das Dilemma zwischen steigenden Rohölpreisen sowie Forderungen der Politik einerseits und einer fehlenden Treibstoffalternative andererseits, ist daher zu einem Teil hausgemacht.

Insbesondere in den vergangenen zwei Jahren hat sich jedoch (auch im Zuge der Diskussion um den Klimawandel) das Interesse der Luftfahrtbranche an einer gesteigerten Klimaverträglichkeit merklich erhöht. Dieser Prozess lässt sich nicht nur an den teils sehr ambitionierten Ankündigungen einzelner Fluggesellschaften, sondern vor allem an den sich bildenden, Branchen übergreifenden Kooperationen ablesen.<sup>82</sup> Die durchgeführten Testflüge mit alternativen Kraftstoffen (siehe oben) sind weitere Anzeichen für ein Umdenken. Von einem ersten Testflug bis hin zur vollständigen Integration eines Treibstoffs in den täglichen Flugbetrieb müssen jedoch die zuvor behandelten Fragen nach der Wirtschaftlichkeit (Marktpreis und Verfügbarkeit), Nachhaltigkeit (Auswirkungen auf Nahrungsmittelpreise sowie

---

<sup>81</sup> Hierauf wies insbesondere Waibel im Expertengespräch hin.

<sup>82</sup> Siehe unter anderen Commercial Aviation Alternative Fuels Initiative (in FAA 2008a), Sustainable Aviation Fuel Users Group (in Boeing 2008b) und Sustainable Aviation Network Europe (SANE 2008).

Biosphäre) und Kompatibilität (zur bestehenden Technik und Infrastruktur) beantwortet werden.<sup>83</sup>

Daher werden zunächst CtL sowie GtL die Abhängigkeit von Rohöl in begrenztem Maße verringern, ohne dabei einen Beitrag zur Klimaverträglichkeit zu leisten. Mittel- bis langfristig ist zu erwarten, dass BtL und Biokraftstoffe zunehmend an Bedeutung gewinnen (siehe Abb. 4.5.).

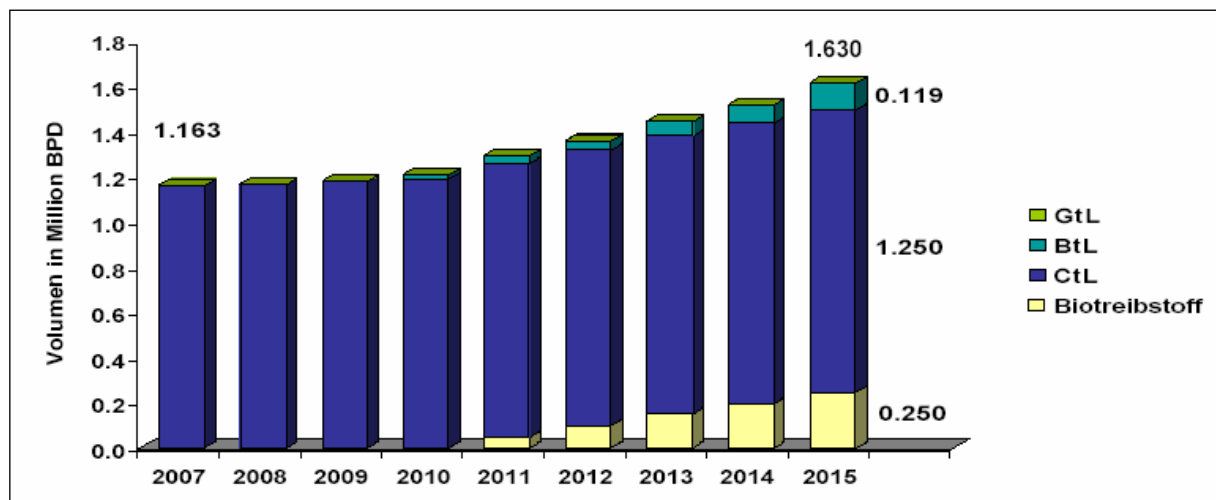


Abb. 4.5.: Erwartete Entwicklung alternativer Flugzeugtreibstoffe weltweit. Die Abbildung zeigt die erwartete Entwicklung der wichtigsten Alternativtreibstoffe GtL (Gas to Liquid), BtL (Biomass to Liquid), CtL (Coal to Liquid) und herkömmlicher Biotreibstoffe in Fass pro Tag (Barrel Per Day, BPD) (Quelle: Übersetzt aus Frost & Sullivan 2008b:11)

Welches Ausgangsmaterial (siehe oben) und Verfahren (herkömmlich oder synthetisch) sich dabei am Markt durchsetzen wird, lässt sich derzeit nicht voraussagen. Mit Sicherheit lässt sich jedoch sagen, dass die Luftfahrtindustrie vor einem Strukturwandel steht, dessen Bewältigung eine enge Zusammenarbeit der beteiligten Akteure (Fluggesellschaften, Treibstoffproduzenten, Politik) voraussetzt. In welcher Form und Geschwindigkeit sich der Strukturwandel vollzieht, wird maßgeblich von luftfahrtexogenen Faktoren abhängen.

Sollte der von außen (durch die Öffentlichkeit und Politik) auf die Luftfahrtindustrie ausgeübte Druck stark abfallen, wie es das Lower Bound Szenario (LBS) annimmt, dürfte sich die Umstrukturierung hin zu alternativen Treibstoffen deutlich verlangsamen. Während GtL und besonders CtL aufgrund ihrer fortgeschrittenen Marktreife und der damit verbundenen Wettbewerbsfähigkeit, weiter zum Einsatz kommen könnten, dürfte die Entwicklung der Biokraftstoffe (der zweiten und dritten

<sup>83</sup> Alleine die Zertifizierung neuer Treibstoffe erstreckt sich in der Regel über mehrere Jahre (siehe Aviationwatch 2008). Teilweise werden darin „unique challenges to rapid adoption“ (Holmgren 2008:16) gesehen. Zur Zertifizierung siehe auch IATA 2008f:43ff.

Generation sowie BtL) einen massiven Schock erleiden. Es darf vermutet werden, dass die Fluggesellschaften eher geneigt wären einen hohen Rohölpreis durch andere Maßnahmen (Weitergabe der Kosten, Kosteneinsparung in anderen Bereichen oder Fuel Hedging (siehe 4.4.1.) zu kompensieren, als hohe Investitionen für Biotreibstoffe zu wagen. Als Konsequenz könnte es einigen, bereits initiierten Forschungsprojekten wie dem Aquatic Species Program ergehen. Das vom US Department of Energy seit 1978 betriebene Projekt zur Gewinnung von Biodiesel aus Algen (National Renewable Energy Laboratory 1998) wurde 1996 aufgrund des gesunkenen Interesses an Rohölalternativen eingestellt. Eine grundlegende Neuausrichtung der Luftfahrtindustrie, wie sie der breit angelegte Einsatz von Wasserstoff erfordern würde, könnte unter dem LBS ausgeschlossen werden.

Sollte der Druck auf die Luftfahrtindustrie jedoch merklich ansteigen (Ende UBS), so gäbe es für die Umsetzung der Wasserstoffvariante prinzipiell eine wirkliche Chance. In dem Abschlussbericht des Cryoplane Projekts (siehe oben) bemerken die Autoren: „Transition from kerosene to hydrogen can be initiated in the mid term only by some drastic political event or action, e.g. political measures to reduce aviation's CO2 emissions“ (Airbus Deutschland 2003:78). Das UBS sieht zwar drastische Events (deutliche Erhöhung der Erderwärmung, Medienkampagne gegen die Luftfahrt) vor, dennoch wäre auch hier die Umstellung des Luftverkehrs auf Wasserstoff sehr unwahrscheinlich. Als wesentlichen Grund für die starke Klimawirksamkeit des Luftverkehrs nimmt das UBS den Prozess der künstlichen Wolkenbildung an (siehe 2.2.2. und 3.1.). Ein Aspekt, der besonders bei der Verbrennung von Wasserstoff problematisch ist (vgl. Diskussion oben).

Im Allgemeinen würde der im UBS aufgezeigte Druckaufbau die Suche nach einem nachhaltigen Rohöl-Substitut dennoch beschleunigen. Kurzfristig darf erwartet werden, dass die Industrie mit einer erhöhten Anzahl an (medienwirksamen) Testflügen reagiert, um ihrem negativen Image entgegenzuwirken. Aufgrund der industriebedingten Trägheit (umfangreiche Testphasen, hohe Sicherheitsstandards, lange Lebenszyklen, erweiterte Zertifizierungen) würde die Einführung von BTL- und Biokraftstoffen der dritten Generation selbst unter UBS Bedingungen nicht kurzfristig zu realisieren sein. Auf kurze Sicht wäre eher ein Ausbau der Biokraftstoffe erster und zweiter Generation in Form einer erhöhten Beimischung zu herkömmlichem Kerosin zu erwarten, der voraussichtlich zu Lasten der klimaschädlicheren CtL- und GtL-Kraftstoffe gehen würde. Mittel- bis langfristig könnte der hohe öffentliche bzw.



politische Druck sowohl auf Anbieter- (Biotreibstoffproduzenten) als auch auf Nachfragerseite (vornehmlich die Fluggesellschaften) den Ausschlag dafür geben, dass die Risikoscheu überwunden wird und massive Investitionen in nachhaltige Alternativtreibstoffe (Biotreibstoffe der dritten Generation sowie BtL) getätigt werden.

#### **4.1.3. Innovative Flugzeugstrukturen und Konzepte**

Der ACARE (Beirat für Aeronautische Forschung in Europa) fasst unter dem Begriff „Airframe“ vier Unterthemen zusammen. Diese sind: Evolution der Flugzeugkapazität, Gewichtsreduktion, aerodynamische Verbesserungen, sowie neue bahnbrechende („breakthrough“) Flugzeugkonzepte „after 2010“ (beide ACARE 2002b:71).<sup>84</sup> Folgend wird auf die ersten drei Punkte überblicksartig eingegangen, um den Fokus auf den größten Veränderungsschritt (die innovativen Flugzeugkonzepte) zu legen. Analog zu 4.1.1. (Innovative Triebwerkskonzepte) soll im Anschluss eine Einschätzung darüber getroffen werden, wie wahrscheinlich die Erreichung des flugzeugstrukturbedingten Reduktionsbeitrags von 20 bis 25 Prozent ist (vgl. Einleitung zu Kapitel vier).

Unter der Evolution der Flugzeugkapazität versteht der ACARE den „natural trend“ (2002b:71) des Größenwachstums. Dieser führt sowohl zum Wachstum der durchschnittlichen Flugzeuggröße als auch zu einer Vergrößerung der durchschnittlichen Plattformgröße der Flugzeuge. Laut dem ACARE könnte durch diese Entwicklung der durchschnittliche Treibstoffverbrauch gemessen in Passagier pro km über einen Zeitraum von 20 Jahren potentiell um fünf bis zehn Prozent sinken (ebd.). Diese Hypothese kann im Rahmen dieser Arbeit im Detail weder belegt noch widerlegt werden, da hierzu eine umfangreiche Bewertung nötig wäre, die es ermöglicht die Flugzeuggrößenentwicklung losgelöst von dem technischen Fortschritt zu analysieren. Es kann jedoch darauf hingewiesen werden, dass mit der Airbus A380 und der Boeing 787 zumindest die Plattformgröße ihr wirtschaftliches Maximum erreicht hat.<sup>85</sup> Neben den genannten Modellen ist die A350 XWB (Extra Wide Body) mit hoher Wahrscheinlichkeit das einzige Flugzeug, das eine nennenswerte

---

<sup>84</sup> Im engeren Sinne ist Airframe mit Flugzeugzelle zu übersetzen. Angesichts der Unterthemen, die im Rahmen der ACARE Ziele hiermit verbunden werden, wird hier jedoch der weiter gefasste Begriff „Flugzeugstruktur“ als Übersetzung für „Airframe“ verwendet.

<sup>85</sup> Dies wurde in den Expertengesprächen mit Reske, Granzeier und Bräunling sehr deutlich (vgl. Anhang B).

Vergrößerung des Rumpfes aufweist und vor 2020 auf den Markt kommen wird (siehe 4.2.2.). Die A350 XWB wurde jedoch nicht aufgrund der Marktnachfrage nach wachsender Rumpfgroße entwickelt, sondern vielmehr durch Innovationen im Triebwerksbereich initiiert.<sup>86</sup> Die vom ACARE angedachte Zunahme der durchschnittlichen Flugzeuggröße kann daher bis 2020 im Wesentlichen nur durch eine Verschiebung innerhalb der bestehenden Flugzeugmodelle erfolgen. Eine solche Tendenz wird in der Tat für die kommenden 20 Jahre erwartet (siehe 4.2.2. und Airbus 2007a:60ff.). Ob diese alleine jedoch zu einer Verringerung des Treibstoffverbrauchs (pro Passagier und km) in Höhe von fünf bis zehn Prozent (siehe oben) führen wird, darf bezweifelt werden.

Neben der Evolution der Flugzeugkapazität soll eine weitere Reduzierung des Flugzeuggewichts zu einer Senkung des Treibstoffverbrauchs beitragen. Aus diesem Grund gewinnt der Einsatz von leichten Strukturstoffen, wie karbonfaserverstärktem Kunststoff (CFK), zunehmend an Bedeutung. Abbildung 4.6. vergleicht die Materialzusammensetzung eines typischen Verkehrsflugzeuges von 2000 mit der zu erwartenden Materialzusammensetzung eines Flugzeuges aus dem Jahr 2020. Es wird davon ausgegangen, dass sich das derzeitige Verhältnis von Aluminium (etwa 65 Prozent) zu Verbundstoff (etwa 15 Prozent) bis 2020 umkehren wird.<sup>87</sup> Hingegen werden bei den übrigen Hauptmaterialien Stahl (15 Prozent) und Titan (5 Prozent) keine Verschiebungen erwartet. Die Materialzusammensetzung für die Flugzeugflotte von 2020 wäre um etwa 20 Prozent leichter als die von 2000. Daraus wird eine Kerosinersparnis von 15 Prozent für Langstreckenflugzeuge und von zehn Prozent für Kurz- bis Mittelstreckenflugzeuge abgeleitet (Greener by Design 2005:16).<sup>88</sup>

Die in Abb. 4.6. erwartete Verschiebung lässt sich bereits an den Materialzusammensetzungen konkreter Flugzeugmodelle der Langstreckenklasse, wie der Boeing B787 und der Airbus A350, erkennen (vgl. Abb. 4.7.).

---

<sup>86</sup> Im Expertengespräch mit Reske wurde dies ausführlich thematisiert (vgl. Anhang B).

<sup>87</sup> Die Begriffe „Verbundstoff“ und „Verbundwerkstoff“ werden in dieser Arbeit synonym verwendet.

<sup>88</sup> Zur Definition der Flugzeugkategorien siehe 4.2.2.

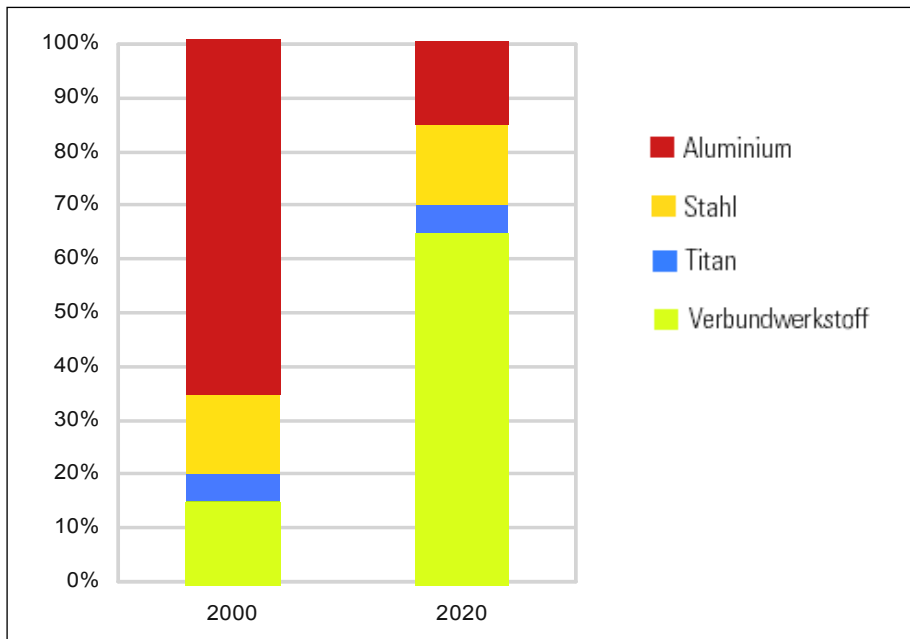


Abb. 4.6.: Typische und erwartete Materialzusammensetzung für kommerzielle Flugzeuge 2000 und 2020. (Quelle: Eigene Darstellung nach Angaben von Greener by Design 2005:17)

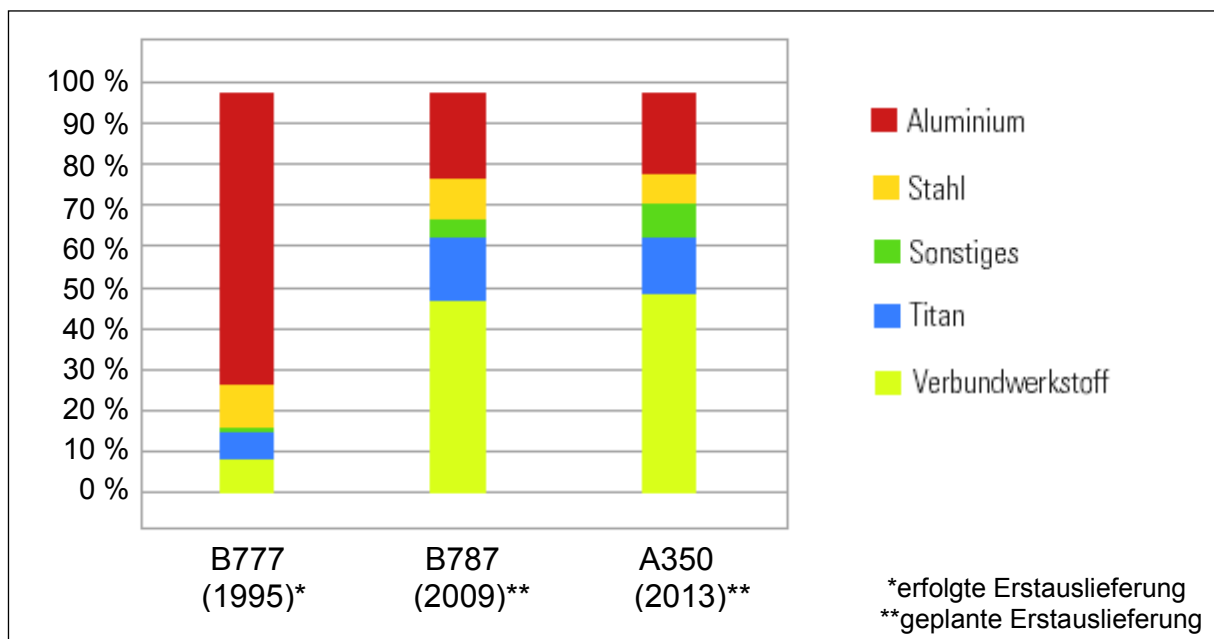


Abb. 4.7.: Entwicklung der Materialzusammensetzung am Beispiel von drei Flugzeugtypen. (Quelle: Aus Clement et al. 2008:12 ergänzt um Boeing 2008c, 2008d und Airbus 2008b)

Fraglich ist, ob die Gewichtsreduzierung durch den verstärkten Einsatz von Verbundstoff in vollem Umfang das Gesamtgewicht des Flugzeugs senken wird oder durch Gewichtszunahmen an anderer Stelle (beispielsweise der Elektronik) kompensiert wird. Zudem dürften die Geschwindigkeit und die Intensität des

Verdrängungsprozesses von Aluminium durch Verbundstoff in hohem Maße von der Preisentwicklung der jeweiligen Rohstoffe im Verhältnis zum Rohölpreis abhängen. Ein weiterer Ansatzpunkt ist die Aerodynamik des Flugzeuges.

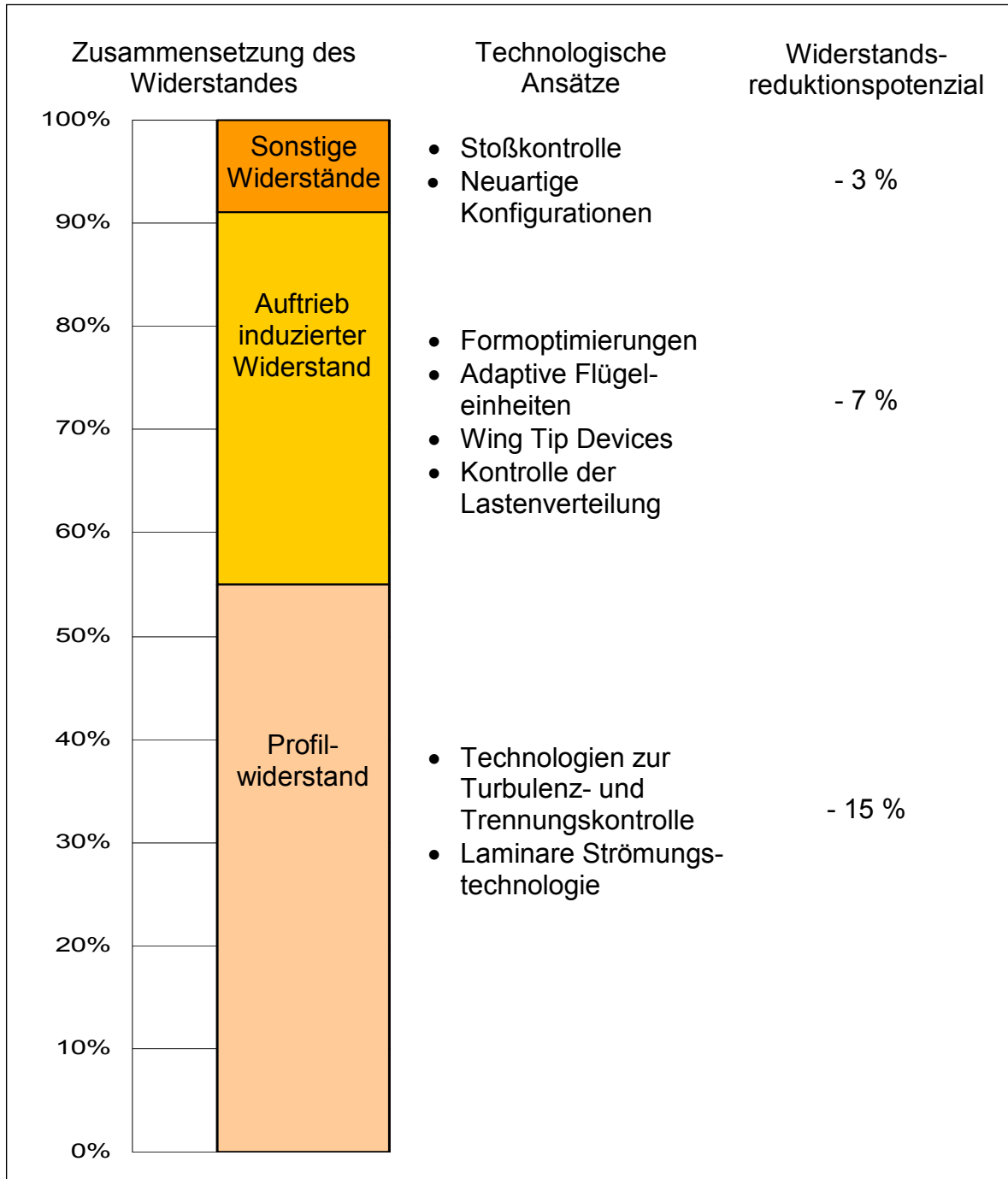


Abb. 4.8.: Zusammensetzung, technologische Ansätze und Reduktionspotenziale des Widerstands eines Flugzeugs im Reiseflug. (Quelle: Nach Schrauf 2006:11)

Um sie zu verbessern, müssen Auftrieb, Luftwiderstand (folgend Widerstand genannt), Gewicht und Schub, als die vier wichtigsten äußeren Kräfte am Flugzeug, optimal in Einklang gebracht werden (Klußmann 2007:323). Während Letztere

bereits angesprochen wurden (zur Gewichtsreduktion siehe oben, zum Schub siehe 4.1.1.), soll folgend kurz auf den Widerstand eingegangen werden.<sup>89</sup> Dieser setzt sich im Wesentlichen aus dem Profilwiderstand (verursacht durch die Viskosität der Luft) und dem induzierten Widerstand (verursacht durch den Auftrieb an den Flügelspitzen) zusammen. Abbildung 4.8. bietet eine Übersicht über diese Zusammensetzung sowie über technologische Ansätze und Potenziale, die im Reiseflug verursachten Widerstände zu reduzieren. Auf eine Summierung der einzelnen Einsparungspotenziale wird hier verzichtet, da es sich bereits bei den Einzelangaben um Maxima handelt, die aufgrund ihrer Korrelation nicht in Kombination ausgeschöpft werden können.<sup>90</sup> Neben der weiteren Optimierung der Flügelform könnten zukünftig adaptive Flügeleinheiten (adaptiv wing devices) bzw. vollständig adaptive Flügel („Morphing Wing“ genannt) zu einer Reduzierung des induzierten Widerstands beitragen. Hintergrund dieses Ansatzes ist, dass herkömmliche Starrflügel für eine bestimmte Parameterkonstellation aus Flughöhe, Geschwindigkeit und Gewicht ausgelegt sind, welche sich über die gesamte Flugmission jedoch nur temporär ergibt. Im Gegensatz dazu könnten sich adaptive Konstruktionen an die entscheidenden Parameter anpassen und so länger bzw. näher am Designoptimum operieren (Monner et al. 2007:2). Insgesamt gilt das „Morphing“ jedoch als „schwieriges Feld“ (Nagel im Expertengespräch, vgl. Anhang B).

Bereits heute werden kleine Flügel, so genannte „Winglets“, senkrecht an den Spitzen der Hauptflügel angebracht, um Wirbel und damit induzierte Widerstände zu verringern (vgl. Abb. 4.9.). Der Einsatz von solchen Wing Tip Devices führt jedoch sowohl zu einer Erhöhung des Flügelgewichts als auch zu einer Zunahme des Profilwiderstands. Auch hier geht die Entwicklung zu einem adaptiven Winglet, welcher seine geometrische Form an den jeweiligen Flugzustand anpasst (Nagel et al. 2006).

Weiter könnte die Aerodynamik durch die Kontrolle der Lastenverteilung am Flügel verbessert werden. Da jedoch das derzeitige Design weitgehend optimiert ist, wird „very little opportunity for further improvement in this area“ (SBAC 2008b:5) gesehen.

---

<sup>89</sup> Ziel ist es, durch die Senkung des Widerstandes und bzw. oder einer Erhöhung des Auftriebs, das Verhältnis der beiden Größen (lift-to-drag-ratio) zu maximieren (vgl. Szodruich et al. 2007:12).

<sup>90</sup> Unter dem Punkt „Sonstige Widerstände“ sind die übrigen Widerstände (unter anderem der Wellenwiderstand) zusammengefasst, die jedoch von untergeordneter Relevanz sind und daher folgend nicht behandelt werden (siehe hierzu Reneaux 2004:9ff.).

Ein Ansatz zur Verringerung des Profilwiderstandes ist der Einsatz von mikroskopisch kleinen Rippen. Die so genannten Riblets fördern die Trennung von Luftströmungen und vermindern dadurch Widerstandseffekte durch Turbulenzen (Reneaux 2004:3). Das Widerstandsreduktionspotenzial von Riblets fällt jedoch verhältnismäßig gering aus. Versuche mit einer Airbus A320, deren Oberfläche zu 75 Prozent mit Riblets versehen wurde, zeigten lediglich eine Widerstandsreduktion von zwei Prozent (Greener by Design 2005:21).

Ein deutlich höheres Potenzial weist die laminare Strömungstechnologie auf, die in passiver und aktiver Form angewendet wird.<sup>91</sup> Bei der ersten Variante (auch „Natural Laminar Flow“ genannt) wird die Beschaffenheit der Oberflächenkontur so gewählt, dass der Druck in Strömungsrichtung abnimmt und die Strömung so turbulenzfrei (laminar) bleibt (SBAC 2008b:5). Für größere Flugzeuge erweist sich die passive laminare Strömungskontrolle als weniger geeignet (Horstmann 2006:2). In diesem Fall ist es möglich, eine laminare Strömung durch Kühlungs- und Absaugverfahren aktiv zu erzeugen (siehe Kloker 2008). Werden passive und aktive Verfahren kombiniert angewendet, spricht man von „Hybrid Laminar Flow“ (SBAC 2008b:5). Schätzungen gehen davon aus, dass sich durch die Anwendung der Hybrid Laminar Flow Technologie am Rumpf und Heck eines Flugzeuges Widerstandsreduzierungen von etwa 11 Prozent realisieren lassen. Abzüglich des Treibstoffs, der zusätzlich für die Kühlung- bzw. Absaugung verwendet wird, ergibt sich daraus eine Treibstoffsenkung von bis zu zehn Prozent (Renaux 2004:6). Sollten weite Teile der Flugzeugoberfläche bestückt werden, könnte der Treibstoffverbrauch gegenüber einem vergleichbaren Mittelstreckenflugzeug ohne die Technologie gar um 16 Prozent reduziert werden (Sawyers und Wilson 1996, siehe auch Rossow 2007:18). Zahlreiche von der EU geförderte Projekte haben auf dem Gebiet der laminaren Strömungstechnologie Fortschritte erzielt.<sup>92</sup> Die einfachere Variante (Natural Laminar Flow) wird am Rumpf der Boeing 787 zum Einsatz kommen (Greener by Design 2007:8). Die komplexere Hybridvariante befindet sich noch weitgehend in der Entwicklung. Bevor sie in den kommerziellen Flugbetrieb integriert werden kann, müssen unter anderen die Aspekte des erhöhten Gewichts durch das Absaugsystem sowie die komplexere Wartung geklärt werden (Kloker 2008). Dann könnte die Technologie zunächst partiell und schließlich auf die gesamte Flugzeugoberfläche

---

<sup>91</sup> Die Laminartechnik wurde im Expertengespräch mit Nagel (vgl. Anhang B) ausführlich besprochen.

<sup>92</sup> Siehe ELFIN I, ELFIN II, LARA, HYLDA, HYLTEC (in CORDIS 2003), EUROTRANS (CORDIS 2007), ALTTA (European Commission 2001), TELFONA (TELFONA Consortium 2005).

angewendet werden. Vor allem zukünftige Flugzeugkonzepte könnten sich hierfür eignen (Greener by Design 2007:8).

Derzeit gilt der „Blended Wing Body“ (BWB) als das aussichtsreichste Konzept, zukünftig die heute vorherrschende „Zigarrenform“ herkömmlicher Verkehrsflugzeuge zu ergänzen.<sup>93</sup> Das Konzept integriert den Rumpf und des Leitwerk in die Flügel und erzielt dadurch eine erhebliche Verbesserung der Aerodynamik (siehe Abb. 4.9.).



Abb. 4.9.: Modell eines Blended Wing Body Flugzeuges. (Quelle: Eigene Aufnahme vom 07.11.2008 im Foyer des Departments für Fahrzeugtechnik und Flugzeugbau der Hochschule für Angewandte Wissenschaften in Hamburg)

Anders als bei der klassischen Röhrenform dienen beim BWB nicht nur die Flügel sondern auch der Rumpf als Auftriebsfläche. Gleichzeitig wird der Widerstand verringert (NASA 2004). Dadurch lässt sich das Verhältnis von Auftrieb zu Widerstand deutlich steigern.<sup>94</sup> Zudem ist es möglich die Triebwerke oberhalb der Flugzeugzelle zu platzieren. Diese Option wird unter anderem im Projekt „NACRE“ (New Aircraft Concept REsearch) unter Führung von Airbus untersucht.<sup>95</sup>

<sup>93</sup> Der Begriff „Blended Wing Body“ wird hier den Begriffen „Flying Wing“ oder „Nurflügler“ vorgezogen, da er das beschriebene Konzept nach Auffassung des Autors am treffendsten wiedergibt. Erste wissenschaftliche Untersuchungen zum BWB Konzept gab es bereits in den fünfziger und sechziger Jahren (siehe Lachmann 1961).

<sup>94</sup> Auf die Aerodynamik des BWB Konzepts gehen Qina et al. näher ein (2004).

<sup>95</sup> Hierzu wurde ein Expertengespräch mit dem Projektleiter Frota (vgl. Anhang B) geführt.

Boeing geht bei einer BWB Kapazität von etwa 800 Passagieren für die Langstrecke von einer Reduktion des Treibstoffverbrauchs um 27 Prozent pro Sitzkilometer gegenüber der konventionellen Form aus (Liebeck 2004:10). Ob sich diese Einsparung tatsächlich erzielen lässt, wird von einigen Experten jedoch bezweifelt. Unter Berufung auf Angaben von Kollegen bemerkt Granzeier im Expertengespräch, dass sich bereits „ein Sprung von zehn Prozent“ als ambitioniert herausstellen könnte. Praktische Erfahrungen konnten bisher ausschließlich im militärischen Betrieb gesammelt werden. Diese sind aufgrund ihrer Ausrichtung auf Kampfeinsätze und der deutlich geringeren Passagierkapazität jedoch kaum mit der Konstruktion eines zivilen BWB zu vergleichen.<sup>96</sup> Für die zivile Anwendung existieren heute einige Modellen wie das der Hochschule für Angewandte Wissenschaften in Hamburg (HAW) (Abb. 4.9.). Das gezeigte Modell „AC 20.40“ (Spannweite etwa drei Meter) wurde im Maßstab 1 zu 30 gebaut. Für 2009 sind Testflüge geplant (Granzeier im Expertengespräch).<sup>97</sup> In den USA kooperieren die Universität von Stanford und Boeing im Rahmen eines BWB Projekts, welches 2009 das erste bemannte Modell im Flug testen wird (Expertengespräch mit Granzeier sowie Bauer 2008). Die Tests sollen dazu beitragen Lösungen für die Probleme zu finden, die sich durch das BWB Konzept ergeben (siehe auch Boeing 2007).

Um die Kapazität des BWBs zu maximieren, erscheint es günstig die Kabine möglichst weit in den Flügel hinein reichen zu lassen. Dies würde jedoch für die äußeren Passagiere bedeuten, dass sie besonders im Kurvenflug deutlich stärkeren Neigungen ausgesetzt wären, als das bei konventionellen Anordnungen der Fall ist.<sup>98</sup> Zudem dürften Fensterpartien, wie sie heute in jedem Passagierflugzeug Standard sind, in diesem Umfang schwer in das BWB Konzept zu integrieren sein bzw. würden den zuvor beschriebenen Einsatz der laminaren Strömungskontrolle deutlich komplexer gestalten. Eine Alternative zu durchsichtigen Partien könnten Bildschirme sein, die durch Kameras einen Eindruck von der Umgebung des Flugzeugs vermitteln (Interview mit Granzeier, vgl. Anhang B).

Darüber hinaus ist das Konzept weitgehend auf die Mittel- bis Langstrecke beschränkt (ebd.). Obwohl auch Konfigurationen mit einer Sitzplatzanzahl von 300 Passagieren entworfen wurden, bietet das BWB Konzept die größten

---

<sup>96</sup> Das Militärflugzeug Northrop Grumman B-2 Spirit der US Airforce ist beispielsweise für eine Besatzung von zwei bis drei Personen ausgelegt (Northrop Grumman 2007).

<sup>97</sup> Das Vorläufermodell (AC 20.30) absolvierte bereits einige Testflüge (HAW 2007:18).

<sup>98</sup> Zur Stabilität des BWB Konzepts siehe Jung und Lowenberg 2005.



Effizienzpotenziale (pro Passagier gemessen) bei einer erheblich höheren Kapazität. Mit über 1000 Sitzplätzen wären Kapazitäten möglich, die die heutige Maximalbeförderung etwa einer Airbus A380 um einige 100 Plätze überschreiten.<sup>99</sup> Derzeit wird modelliert, wie sich angesichts einer solch hohen Passagierzahl Evakuierungen innerhalb der vorgegeben 90 Sekunden sicher durchführen lassen.<sup>100</sup> Erste Ergebnisse sprechen dafür, dass sich die Herausforderung bewältigen lässt.<sup>101</sup> Die Klärung der angesprochenen Punkte wird zeigen, wann und in welcher Form mit der Einführung des BWB Flugzeuges zu rechnen ist. Dass es sich hierbei nicht länger um eine Vision, sondern um konkrete Konzepte und Projekte handelt, lässt sich bereits heute sagen. Eine Untergruppe des Greener By Design Zusammenschlusses hielt 2005 den Start "of a civil BWB by the USA within the next 20-30 years to be a strong possibility" (2005:20). Nach Granzeier „müsste [...] ungefähr um 2030 das erste BWB Flugzeug auf der Piste stehen“ (im Expertengespräch). Mögliche Einführungszeitpunkte und Varianten werden im Anschluss an das nun folgende Fazit im Rahmen des Szenarienansatzes weiter diskutiert.

Die vom ACARE aufgestellte Hypothese zur Evolution der Flugzeugkapazität konnte nicht abschließend bewertet werden. Der mit dieser Annahme in Verbindung gebrachte Reduktionsbeitrag von fünf bis zehn Prozent, kann jedoch aufgrund der gewonnenen Erkenntnisse (Reifegrad der Röhrenform, globale Flottenentwicklung) als äußerst optimistisch angesehen werden.

Der Bedeutungsgewinn der Verbundstoffe als Hauptmaterial für Flugzeuge ist ein Prozess, der bereits begonnen hat. In welcher Geschwindigkeit und Intensität er sich fortsetzen wird, hängt von der Entwicklung der Materialien- und Rohölpreise ab. Es kann als sehr wahrscheinlich angesehen werden, dass die durch leichtere Materialien erzielten Gewichtseinsparungen durch Gewichtszunahmen an anderer Stelle zu einem (Groß-)Teil kompensiert werden. Folglich wären kommende Flugzeuge mit einem höheren Verbundstoffanteil insgesamt kaum leichter als vergleichbare Vorgängermodelle.

---

<sup>99</sup> Die Maximalkapazität der Airbus A380 beträgt 853 Sitzplätze (EADS 2008). Siehe auch Abschnitt 4.3.1.

<sup>100</sup> Nach der Federal Aviation Administration muss ein Flugzeug ab einer Kapazität von 44 Passagieren innerhalb von 90 Sekunden evakuiert werden können (siehe FAA 1990).

<sup>101</sup> Ausführlich wird dieser Aspekt von der Universität von Greenwich untersucht (siehe Greenwich University 2008).

Abbildung 4.8. hat gezeigt, dass die Einsparungspotenziale der Aerodynamik besonders im Bereich des Profilwiderstandes zu erwarten sind. Kurzfristig wird hier die passive laminare Strömungstechnologie verstärkt zum Einsatz kommen, ohne dabei größere treibstoffreduzierende Effekte erzielen zu können. Sollten sich die Gewichtszunahmen des Hybrid Laminar Flows begrenzen lassen, könnte diese Technologie mittel- bis langfristig einen wichtigen Beitrag zur Verbesserung der Aerodynamik leisten.

Da innovative Flugzeugkonzepte in Form des BWB nicht „after 2010“ (siehe Einleitung zu 4.2.3.) sondern frühestens nach 2030 zu erwarten sind, wird dieser Faktor keinen Einfluss auf das ACARE Ziel für 2020 haben.

Aufgrund der genannten Punkte kann geschlussfolgert werden, dass eine Erreichung des 20- bis 25-Prozentbeitrags der Flugzeugstruktur zum ACARE Kohlendioxidgesamtziel (50 Prozent Reduzierung) als unwahrscheinlich zu erachten ist. Es muss angemerkt werden, dass diese Einschätzung nicht mit derselben Sicherheit getroffen wird, mit der das Reduktionsziel im Bereich der Triebwerke bewertet wurde. Hierzu waren die Anzahl und die Komplexität, der unter „Airframe“ zusammengefassten Unterthemen, zu hoch. Mit großer Sicherheit lässt sich hingegen sagen, dass innovative Flugzeugkonzepte bis 2020 keine Rolle spielen werden. Wann und in welcher Form das BWB Konzept den kommerziellen Flugbetrieb aufnehmen könnte, wird nun im Rahmen des Szenarienansatzes weiter erörtert.

Die Anwendung der Szenarienperspektive zeichnet in Bezug auf das BWB Konzept ein ambivalentes Bild. Da der BWB und der Einsatz von Wasserstoff gekoppelt sind (siehe oben) und sich dessen Emission im Lower Bound Szenarios (LBS) als unproblematisch herausstellt, wäre hier die zentrale Grundvoraussetzung für die Umsetzung des BWB Konzepts erfüllt. Andererseits wurden unter 4.1.1. im Fall des LBS bereits kleinere Innovationsschritte (in Form des Propfans) nahezu ausgeschlossen. Wie die vorangegangene Auseinandersetzung gezeigt hat, geht die Einführung des BWB Konzepts mit einem umfangreichen Strukturwandel einher. Daher kann angenommen werden, dass die Industrie die hohen Initialkosten scheuen und weiter auf die konventionelle Röhrenform setzen würde.

Sollte dagegen eine Drucksituation wie 2030 im Upper Bound Szenario (UBS) entstehen, ergäbe sich das Spiegelbild zum LBS. Ohne Wasserstoff als Primärtreibstoff müsste der klimarelevante Sinn des BWB Konzepts neu bewertet

werden. Das Konzept hätte nur dann eine Chance auf Realisierung, wenn parallel erhebliche Fortschritte im Bereich der alternativen Treibstoffe erzielt würden (vgl. Szenarienansatz in 4.1.2.). In diesem Fall könnte der hohe Druck dazu führen, dass der beschriebene Strukturwandel einsetzt. Bis dieser abgeschlossen und zumindest der Langstreckenverkehr mit BWB Flugzeugen abgewickelt werden könnte, würden dennoch Jahrzehnte vergehen.

## **4.2. Operative und Strategische Ansätze**

Als Grundlage für diesen Hauptabschnitt müssen die zentralen Begriffe zunächst definitorisch von einander abgegrenzt werden. Operative Ansätze werden nach Kreamer als „kurzfristig (weniger als 1 Jahr) [...], konkret“ und „einen Teil des Betriebes betreffend“ (2008) verstanden. Dagegen wirken sich strategische Ansätze „langfristig (Zeithorizont länger als drei Jahre) und grundsätzlich“, „global“ auf „wesentliche Produktbereiche“ (ebd.) aus.

Das Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) sieht im Luftverkehrsmanagement (Air Traffic Management, ATM) das wichtigste operative Werkzeug (vgl. IPCC 1999:11). In dieser Arbeit wird das Luftverkehrsmanagement in erster Linie als infrastruktureller Ansatzpunkt interpretiert, der am Beispiel des europäischen Luftraums im folgenden Hauptabschnitt (4.3.) ausführlich thematisiert wird. Darüber hinaus steht den Fluggesellschaften eine Reihe von kleineren operativen Maßnahmen zur Verfügung. Diese reichen von gewichtssparenden Maßnahmen, wie der Entfernung der Aschenbecher (bei Brussels Airlines in Financial Times Deutschland 2008a) oder dem Austausch der zehn kg schweren Flughandbücher durch leichtere Laptops (Deutsche Lufthansa 2002:11), über Fluggeschwindigkeitsreduktionen (siehe 4.4.2. Administrative Instrumente) bis hin zu neuen Konzepten der Stromversorgung an Board. In diesem Bereich könnte das Projekt „Kabinentechnologie und innovative Brennstoffzellenanwendung“ unter Leitung von Airbus Deutschland für weitere Fortschritte sorgen (siehe Behörde für Wirtschaft und Arbeit Hamburg 2008).

Allgemein fällt das operative „Fenster“ (Waibel im Expertengespräch) der Fluggesellschaften jedoch klein aus, da die einzelnen Maßnahmen jeweils nur einen sehr geringen Beitrag zur Emissionsverringerung leisten bzw. sie schon weitgehend ausgeschöpft wurden. Dies zeigt sich zum Beispiel an der zunehmend steigenden

Flugzeugauslastung.<sup>102</sup> Auf eine weitere Vertiefung dieser Aspekte wird daher verzichtet. An Stelle dessen wird exemplarisch ein innovatives Verfahren der Triebwerkswäsche als eine wichtige operative Einzelmaßnahme vorgestellt. Im Anschluss wird die globale Flottenentwicklung als der zentrale strategische Ansatz thematisiert. Auf globaler Maßstabsebene und ergänzt um Beispiele der Deutschen Lufthansa soll abgeschätzt werden, in welchem Umfang, wie schnell und durch welche Flugzeugmodelle hier zukünftig Emissionsreduktionen zu erwarten sind. Der letzte Teil dieses Hauptabschnitts wirft einen Blick auf mögliche zukünftige Operationskonzepte, die aus heutiger Sicht sowohl hohe Einsparungspotenziale als auch immense Herausforderungen mit sich bringen und daher als visionär zu bezeichnen sind. Wie aus 4.1. bekannt, wird für die Einschätzung des zukünftigen Verlaufs der jeweiligen Ansätze auf die entwickelten Szenarien zurückgegriffen.

#### **4.2.1. Innovative Triebwerkswäsche**

Während des gesamten Betriebs und insbesondere während der Start- und Landephase sowie der Rollbewegungen am Boden kommt es in den Triebwerken zu Verunreinigungen durch Sand, Salze und andere Partikel (Rupp 2001:4).<sup>103</sup> Diese führen dazu, dass die Verbrennung im Kerntriebwerk (vgl. Abschnitt zu Triebwerken 4.1.1.) unsauber und unter einem erhöhten Treibstoffkonsum bzw. Emissionsausstoß abläuft. Zur Vermeidung der Verschmutzungseffekte werden die Triebwerke daher seit Jahren regelmäßig gereinigt (Aviation Week 2008). Lufthansa Technik hat nach drei Jahren Entwicklungszeit kürzlich ein innovatives Verfahren der Triebwerkswäsche vorgestellt (Interview mit Giljohann, vgl. Anhang B). Auf das Cyclean Engine Wash genannte Verfahren wird nun kurz eingegangen.

Im Gegensatz zu den meisten bisher auf dem Markt verfügbaren Waschsystemen arbeitet Cyclean nicht mit einzeln eingehängten Düsen, sondern mit einem Spinner Adapter, der auf das Triebwerkszentrum (den Spinner) aufgesetzt wird (siehe Abb. 4.10.)

---

<sup>102</sup> Bei der Deutschen Lufthansa lag die Flugzeugauslastung (hier Sitzladefaktor genannt) im ersten Halbjahr 2008 bei 82,8 Prozent (inklusive reisende Mitarbeiter sowie Nutzer von Bonusflügen) bzw. 78,3 Prozent (nur Vollzahler) (Deutsche Lufthansa 2008a:29 und 2008c:5). Der globale Wert für 2006 beträgt 76 Prozent (Airbus 2007a:14).

<sup>103</sup> In der Industrie wird der Verschmutzungsprozess als „Compressor Fouling“ bezeichnet (siehe zum Beispiel Naeem 2008).



Abb. 4.10.: Das Cycleclean Engine Wash Verfahren bei der Anwendung. (Quelle: Aus Lufthansa Technik 2008a)

Über zwei Düsen und unter hohem Druck (bis zu 100 Bar) wird auf 70 Grad Celsius erhitztes, entmineralisiertes Wasser in das Kerntriebwerk gesprüht. „This cleans the compressor very efficiently and minimizes the amount of water remaining within the engine“ (Lufthansa Technik 2008b:1).<sup>104</sup> Gesteuert und angetrieben wird der Reinigungsvorgang durch eine mobile Einheit. Da das Verfahren ohne Öffnung der Triebwerksverkleidung und des Schubumkehrers auskommt, kann es unter einer Stunde und damit am Gate angewendet werden (Lufthansa Technik 2008a).<sup>105</sup> Ein Standlaufstest im Anschluss an das Verfahren entfällt, weshalb keine zusätzlichen Emissionen entstehen.

Die für diese Arbeit bedeutendste Frage ist jene nach dem Kerosineinsparungspotenzial und der damit verbundenen Möglichkeit, Emissionen zu reduzieren. Lufthansa Technik rechnet mit einer Reduzierung des Treibstoffverbrauchs, respektive der Emissionen, von 0,5 Prozent bis 0,75 Prozent je nach Flugzeugmuster und Triebwerkstyp (Lufthansa Technik 2008b:1). Auf den ersten Blick scheinen diese geringen Prozentwerte unbedeutend zu sein. Die in Tabelle 4.2. vorgenommene Überführung in absolute Werten zeigt jedoch, dass sich selbst am unteren Ende des Reduktionspotenzials, relevante Einsparungen ergeben.

---

<sup>104</sup> Beim Triebwerkstyp CF6-80 wird beispielsweise ein Wasserbedarf von 110 Litern angegeben, der damit um 140 Liter unter „herkömmlichen Verfahren“ (Lufthansa Technik 2008a) liegt.

<sup>105</sup> Bisher dauerte eine vergleichbare Triebwerkswäsche durchschnittlich sechs Stunden (ebd.).

	Treibstoff			Kohlendioxid		
	Verbrauch pro Flugstd. (in t)	Verbrauch pro Jahr (in t)	Senkung pro Jahr (in t)***	Emission pro Flugstd. (in t)	Emission pro Jahr (in t)	Senkung pro Jahr (in t)***
<b>A320 / B737</b>	XXX	XXX*	XXX	XXX	XXX	XXX
<b>A340-300</b>	XXX	XXX**	XXX	XXX	XXX	XXX
<b>B747-400</b>	XXX	XXX**	XXX	XXX	XXX	XXX

\*bei durchschnittlich XXX Flugstd. pro Jahr \*\*bei durchschnittlich XXX Flugstd. pro Jahr  
 \*\*\*bei geschätzter Senkung um XXX Prozent

Tab. 4.2.: Auswirkungen des Cyclean Engine Wash Verfahrens auf Treibstoffverbrauch und Kohlendioxidemission am Beispiel verschiedener Flugzeugtypen der Deutschen Lufthansa Flotte. (Quelle: XXX)

Über ein Jahr gerechnet würden die Treibstoffminderungen nicht nur zu den hier aufgeführten XXX bis XXX Tonnen Kohlendioxideinsparungen führen, sondern auch die Emission der übrigen Verbrennungsprodukte eines Verkehrsflugzeugs senken (vgl. 2.1.3.). Das allgemeine Potenzial des Cyclean Verfahrens zeigt sich dabei nicht nur theoretisch anhand der oben angeführten Beispielrechnungen (Tab. 4.2.), sondern bereits heute in der praktischen Anwendung. Seit XXX konnten durch den Einsatz des Verfahrens an fünf verschiedenen Flugzeugtypen insgesamt etwa XXX Tonnen Kohlendioxid eingespart werden. Ein ähnliches Waschverfahren von Pratt & Whitney (hier „EcoPower“ genannt) brauchte für eine Einsparungsmenge von 5 440 Tonnen einen Zeitraum von drei Jahren (Pratt & Whitney 2008). Hinzu kommt der ökonomische Anreiz für Fluggesellschaften durch die Senkung der jährlichen Treibstoffkosten zwischen XXX USD (für die Airbus A320 bzw. Boeing 737) und XXX USD (Boeing 747-300). Demgegenüber stehen die geringen Kosten pro Waschvorgang zwischen XXX und XXX Euro (Giljohann im Expertengespräch). Laut Lufthansa Technik empfiehlt sich die Anwendung von Cylean in einem Intervall von XXX Flugstunden oder XXX jährlich. Die Standorte hierfür beschränken sich bisher auf sechs deutsche Flughäfen sowie zwei in den USA (Lufthansa Technik 2008b:2). Inwieweit Cyclean einen (begrenzten) Beitrag zur Reduzierung der Klimawirksamkeit des globalen Luftverkehrs leisten kann, wird in hohem Maße davon abhängen, ob sich das Verfahren zukünftig weiter am Weltmarkt etablieren kann. Derzeit nutzen es bereits XXX Fluggesellschaften (Giljohann im Expertengespräch). Da es sich bei Lufthansa Technik um den Weltmarktführer (Lufthansa Technik 2008c) auf dem Gebiet der Flugzeugwartungs-, Reparatur- und Überholungsdienstleistungen (kurz

MRO für Maintenance, Repair, Overhaul) handelt, darf erwartet werden, dass die nötige Erfahrung für eine erfolgreiche Marktpositionierung vorhanden ist.

Angewendet auf das Cycleclean Engine Wash Verfahren führt die Szenarienperspektive lediglich zu sehr allgemeinen Aussagen. Prinzipiell ist anzunehmen, dass die Drucksituation des UBS (Upper Bound Szenario) die Ausweitung des Verfahrens fördert. Der Vizepräsident von Pratt & Whitney Global Service Partners, Keenen betont: "The mix of environmental awareness and emphasis on operational efficiency creates a strong business case for our EcoPower service" (in Pratt & Whitney 2008). Analog dürfte dies für Cycleclean zutreffen. Gegenüber den unter 4.1. beschriebenen technischen Ansätzen ließen sich mit den Triebwerkswaschverfahren bereits kurzfristig Emissionsreduktionen erzielen. Neben der Realisierung von Treibstoff- respektive Kosteneinsparungen könnten Fluggesellschaften versuchen, durch die Anwendung des Verfahrens ihrem Image als „Klimakiller“ entgegenzuwirken (vgl. 3.2.).

Dagegen kann durch den geringen Druck des Lower Bound Szenarios (in 2030) davon ausgegangen werden, dass die Anwendung von Cycleclean und ähnlichen Maßnahmen ausschließlich aus betriebswirtschaftlichen Gründen erfolgen würde.

#### **4.2.2. Globale Flottenentwicklung**

Während sich der vorangegangene Abschnitt mit einer konkreten operativen Maßnahme beschäftigte, wird folgend versucht, die wichtigsten Aussagen zur globalen Flottenentwicklung zusammen zu tragen. Dabei wird sowohl auf die Gesamtentwicklung als auch auf die Verschiebungen innerhalb der Märkte kurz eingegangen. Vor diesem Hintergrund wird dann nach Flugzeugklassen differenziert aufgezeigt, welche emissionsrelevanten Einsparungspotenziale sich durch den Markteintritt neuer bzw. weiterentwickelter Flugzeugmodelle kurz-, mittel- und langfristig ergeben. Hieraus werden Abschätzungen über die Relevanz der Flottenentwicklung als strategisches Instrument abgeleitet.

Im globalen Luftverkehr befanden sich Ende 2007 etwa 19 000 Flugzeuge im Einsatz (Boeing 2008a:49). Nach Schätzungen von Boeing wird sich diese Zahl bis 2027 um gut 88 Prozent auf 35 800 erhöhen (ebd.). Der Zuwachs ergibt sich aus der Auslieferung von insgesamt 29 400 neuen Flugzeugen (28 540 Passagiermaschinen und 860 Frachtern) bei gleichzeitiger Ausmusterung von 15 100 Flugzeugen (13 680

Passagiermaschinen und 1 420 Frachtern). Die globale Flotte wird sich demnach bis 2027 um 82 Prozent gegenüber der heutigen erneuert haben. Etwa 2 500 Passagierflugzeuge werden im Frachtbetrieb weiter eingesetzt, wodurch sich die Anzahl der Frachter in Kombination mit 860 Neuerwerbungen (und der oben genannten Ausmusterung) bis 2027 auf 3 890 nahezu verdoppeln wird (siehe Zusammenfassung in Abb. 4.11.).<sup>106</sup>

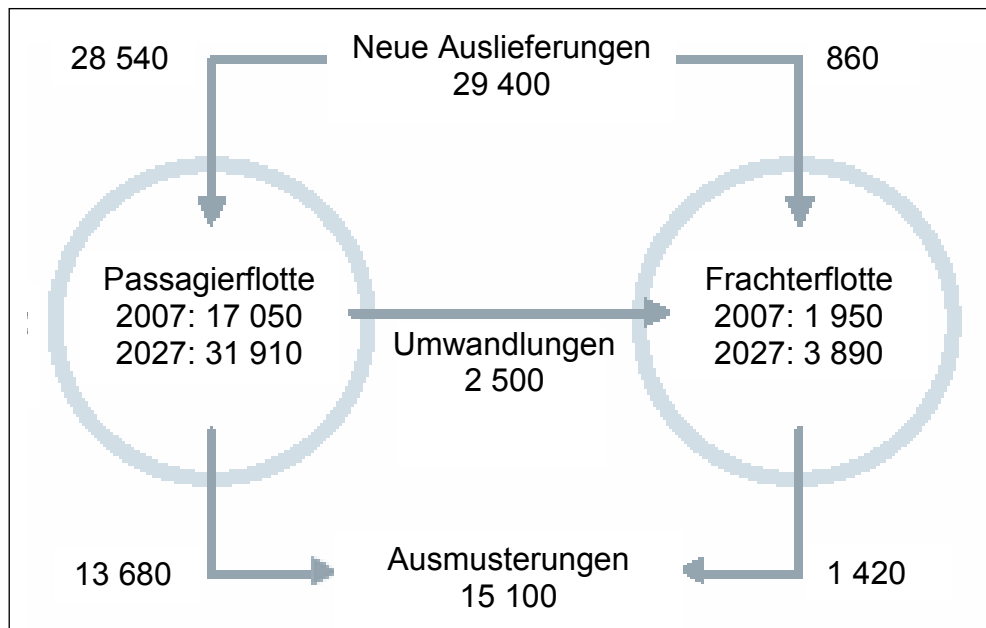


Abb. 4.11.: Erwartete Entwicklung der weltweiten Flugzeugflotte zwischen 2007 und 2027. (Quelle: Eigene Darstellung in Anlehnung an Airbus 2007a:6 und auf Datenbasis von Boeing 2008a:49)

Deutlichere Verschiebungen zeichnen sich innerhalb der Passagierkategorie ab. Hier wird erwartet, dass sich die Dominanz der Single Aisle Flugzeuge weiter fortsetzt (erwarteter Marktanteil von 78 Prozent in 2027).<sup>107</sup> Innerhalb der Single Aisle Kategorie kommt es zu einer Verschiebung von der Kurzstrecke zur Mittelstrecke (siehe Tab. 4.3.).

<sup>106</sup> Der Frachteranteil am Gesamtmarkt steigt dabei um ein Prozent nur leicht auf 11 Prozent (Boeing 2008a:18).

<sup>107</sup> Basierend auf der Einteilung von Boeing (2008a:48) werden Flugzeuge in dieser Arbeit in Langstreckenflugzeuge (Twin Aisle) ab einer Reichweite von etwa 8 000 km und darüber, sowie in Single Aisle Flugzeuge unterteilt. Letztere werden weiter in Mittel- (etwa 3 000 bis 8 000 km Reichweite) und Kurzstreckenflugzeuge (Reichweite unter 3 000 km) gegliedert.



	2007	2027	Wachstum 2007 bis 2027	
	Anzahl Flugzeuge (Marktanteil in %)	Anzahl Flugzeuge (Marktanteil in %)	absolut	in %
<b>Langstrecke</b>	3 200 (19)	7 130 (22)	+ 3 930	+ 123
<b>Mittelstrecke</b>	10 770 (63)	22 150 (70)	+ 11 380	+ 106
<b>Kurzstrecke</b>	3 080 (18)	2 630 (8)	- 450	- 15
<b>Gesamt</b>	17 050	31 910	+ 14 860	+ 87

Tab. 4.3.: Zusammensetzung der weltweiten Passagierflotte 2007 und 2027. Definition der Streckeneinteilung siehe Fußnote 107. (Quelle: Eigene Darstellung auf Datenbasis von Boeing 2008a:49)

Dies ist wichtig zu betonen, da heute fast die Hälfte des weltweiten Treibstoffverbrauchs auf Strecken von weniger als 2 700 km (und damit auf die Kurzstrecke) entfällt (Gmelin et al. 2008:16). Daher ist auch hier eine Verlagerung des relativen Treibstoffverbrauchs hin zur Mittelstrecke zu erwarten.

Im Single-Aisle Segment wird die nächste signifikante Steigerung der Treibstoffeffizienz für 2013 erwartet, wenn die ersten mit Getriebefan ausgerüsteten Flugzeuge dieser Klasse den Betrieb aufnehmen (vgl. 4.1.1.). Die Flugzeuge von Mitsubishi Heavy Industries (MRJ 70 und MRJ 90) werden bei einer Reichweite von 1 610 bis 3 330 km über eine Kapazität von 70 bis etwa 90 Sitzplätzen verfügen (Mitsubishi Regional Jet 2008). Darüber soll die C-Series (110 bis 130 Plätze) von Bombardier mit einer Reichweite von etwa 4 000 bis 5 000 km „the greenest single-aisle aircraft in its class“ (Scott, President von Bombardier Commercial Aircraft in Bombardier 2008) werden. Scott verspricht eine Kohlendioxid- und Stickoxidreduktion in Höhe von 20 bzw. 50 Prozent gegenüber „current in-production aircraft of similar size“ (ebd.). Besonders wenn das von Bombardier angestrebte Absatzziel von 6 300 Einheiten innerhalb der nächsten 20 Jahre erreicht wird, könnte ein weiterer Schritt in Richtung Reduzierung der Klimawirksamkeit dieser Klasse gemacht werden.<sup>108</sup> Dies wird jedoch nur der Fall sein, wenn die angegebenen zwei Liter pro 100 pkm sich nicht als reine Marketingankündigung entpuppen.<sup>109</sup> Bombardier selbst schränkt die Belastbarkeit der Angabe von zwei Liter in einer Fußnote ein und verweist darauf, dass sich die C-Series noch in der „conceptual

<sup>108</sup> Laut Boeing werden bis 2027 in der Kapazitätsklasse von 90 bis 175 Sitzen insgesamt 16 280 verkauft (2008a:49). Demnach hätte die C-Series einen Marktanteil von knapp 40 Prozent. Als Erstkunde hat die Deutsche Lufthansa eine Absichtserklärung über 30 Flugzeuge (Listenpreis 46,7 Millionen USD) sowie weitere 30 Optionen unterzeichnet (Financial Times Deutschland 2008).

<sup>109</sup> Pkm sind Passagier-Kilometer. Die Einheit Liter pro pkm beschreibt wie viel Treibstoff pro Passagier und zurückgelegtem km verbraucht wird.

design phase“ (Bombardier 2008) befindet.

Mittelfristig (um etwa 2018) werden die Nachfolger von Airbus A320 und Boeing 737 (mit oder ohne Getriebefan) die Gesamteffizienz der Mittelstreckenklasse steigern (Clement et al. 2008:45).<sup>110</sup>

Deutliche Treibstoffeffizienzverbesserungen (30 Prozent und mehr) sind derzeit nur langfristig (etwa ab 2035) zu erwarten. Dann wird sich herausstellen, ob es gelungen ist, die technischen Herausforderungen des Propfans (vgl. 4.1.1.) zu lösen und ihn in die zukünftige Serienproduktion zu integrieren.

Im Segment der Twin-Aisle (Großraum- bzw. Langstreckenflugzeuge) markierte die erste Auslieferung der Airbus A380 im Oktober 2007 den Beginn einer neuen Phase

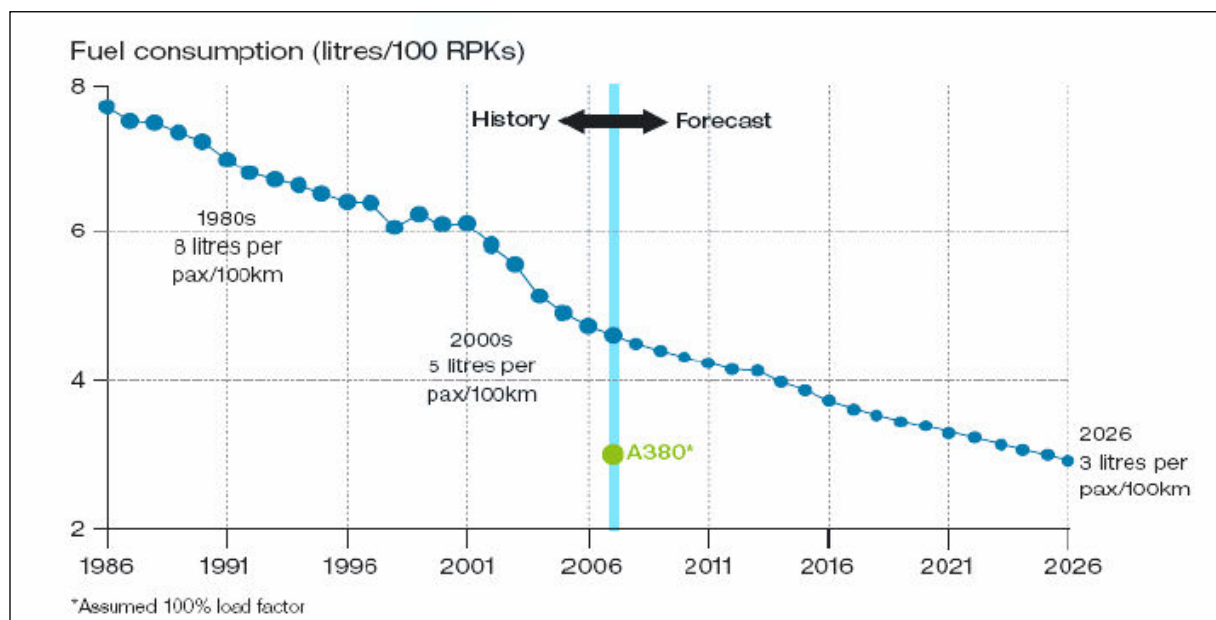


Abb. 4.12.: Entwicklung und Prognose des durchschnittlichen Kraftstoffverbrauchs der globalen Passagierflugzeugflotte. Angaben pro Jahr in pkm. Weitere Erläuterungen siehe Text. (Quelle: Aus Airbus 2007a:57)

der Effizienzsteigerung.<sup>111</sup> Das „Drei-Liter-Flugzeug“ (Deutsche Lufthansa 2007b:3) wird seinem Namen jedoch nur bei einer Auslastung (load factor) von 100 Prozent gerecht.<sup>112</sup> Abbildung 4.12. zeigt die bisherige sowie die von Airbus erwartete Entwicklung des durchschnittlichen Kraftstoffverbrauchs der weltweiten Passagierflugzeugflotte. Über die A380 hinaus macht Airbus dabei keine Angaben, welcher Auslastungsgrad den übrigen Werten (gepunktete Linie) zugrunde liegt. Den

<sup>110</sup> Die Entwicklung des A320 Nachfolgers soll ab 2014 beginnen und rund zehn Milliarden Euro kosten (Handelsblatt 2008a).

<sup>111</sup> Zur Erstausslieferung siehe Airbus 2007b.

<sup>112</sup> Im Expertengespräch bewertet Granzeier die Einsparungen der A380 „gegenüber den vorhergehenden Flugzeugen“ als „gering“ (vgl. Anhang B).

durchschnittlichen Auslastungsgrad für die globale Passagierflotte gibt Airbus (im selben Dokument) für 2006 mit 76 Prozent an (Airbus 2007a:14). Die Platzierung des A380 Wertes auf Höhe von drei Litern pro pkm liegt damit im Verhältnis zu der Verlaufskurve zu tief.<sup>113</sup> Die Gesamtaussage ändert sich durch die angebrachte Quellenkritik jedoch nicht. Es wird erwartet, dass sich der durchschnittliche Treibstoffverbrauch der globalen Flugzeugflotte von derzeit 4,8 Liter auf drei Liter (pro 100 pkm) in 2026 verringern wird.<sup>114</sup> Gegen Ende 2009 werden hierzu in der Twin-Aisle Klasse die geplanten 25 Auslieferungen der neuen Boeing 787 Dreamliner beitragen (Boeing 2008c).<sup>115</sup> Die A380 verzeichnet 192 Bestellungen (darunter 15 von der Deutschen Lufthansa) bei bisher acht ausgelieferten Flugzeugen (Stand September 2008) (Airbus 2008c und Deutsche Lufthansa 2008a:28). Etwa vier Jahre später wird der Markteintritt der Airbus A350 XWB (je nach Version 270 bis 350 Plätze) die Phase der größeren Effizienzsteigerungen auf der Langstrecke abschließen (vgl. Airbus 2008b).<sup>116</sup> Ankündigungen zu Modellerneuerungen in der Langstreckenklasse für die Zeit nach 2013 sind dem Verfasser dieser Arbeit aktuell nicht bekannt.

Damit hat die Darstellung der globalen Flottenentwicklung und ihrer Modellerneuerung einige zentrale Erkenntnisse gebracht. Die in Kapitel zwei thematisierte Zunahme der Passagierzahlen sowie des Frachtaufkommens wird über die kommenden 20 Jahre zu einer starken quantitativen Erhöhung (plus 88 Prozent) der weltweit betriebenen Flugzeuge führen und dabei die heute eingesetzte Flotte nahezu grunderneuern. Investitionen in Höhe von 3,2 Billionen USD werden bis 2027 erwartet (Boeing 2008a:49).<sup>117</sup> Dies zeigt, dass das strategische Instrument der Flottenerneuerung in der Luftfahrtindustrie weiterhin eine zentrale Rolle spielen wird.<sup>118</sup>

---

<sup>113</sup> Zudem wären Angaben zu der Sitzplatzkonfiguration, die der Berechnung zugrunde gelegt wurden, hilfreich gewesen. Auf der Internetseite nennt Airbus für die A380 eine Sitzplatzanzahl von 525 (Airbus 2008c). Allein die an Emirates ausgelieferten A380 weisen jedoch ein Kapazitätsspektrum von 489 bis 604 Sitzplätzen auf (Airliners 2008). Maximal könnte das Großraumflugzeug bis zu 853 Passagiere transportieren (EADS 2008).

<sup>114</sup> Dass ein „Drei-Liter-Flugzeug“ auch ohne Vollauslastung keine Illusion ist, zeigt eine Airbus A340-300 der Lufthansakonzernflotte, die 2007 einen durchschnittlichen Treibstoffverbrauch von 3,1 Litern pro 100 pkm erreichte. Insgesamt lag der durchschnittliche Treibstoffverbrauch der Konzernflotte 2007 bei 4,3 Litern pro 100 pkm (Deutsche Lufthansa 2008a:U3).

<sup>115</sup> Für die 787 liegen derzeit (Stand Oktober 2008) 78 Bestellungen vor (ebd.).

<sup>116</sup> Zur A350 XWB siehe auch 4.1.3.

<sup>117</sup> Allein die Deutsche Lufthansa plant in den kommenden acht Jahren 14 Milliarden Euro für 175 neue Flugzeuge zu investieren (2008a:28).

<sup>118</sup> Die Flottenentwicklung der Lufthansa wurde ausführlich im Expertengespräch mit Reske (vgl. Anhang B) besprochen.

Während die Relationen zwischen Passagier- und Frachtflugzeugmarkt (etwa 9 zu 1) sowie zwischen Langstrecken- und Single Aisle Markt (etwa 2 zu 8) nahezu unverändert bleiben, wird sich das Verhältnis innerhalb des Single Aisle Markts zu Gunsten der Mittelstrecke verschieben.

Ab 2013 werden Modelle von Mitsubishi Heavy Industries (Kurzstrecke) und Bombardier (Mittelstrecke) Effizienzsteigerungen im Single Aisle Markt erzielen. Mittelfristig (ab etwa 2017) werden die Nachfolger der erfolgreichen Flugzeugfamilien A320 und Boeing 737 dem wachsenden Mittelstreckenmarkt weitere Treibstoffeinsparungspotenziale ermöglichen. Auf längere Sicht (in etwa 20 Jahren) könnte der Propfan vor allem auf der Kurzstrecke helfen, den Treibstoffverbrauch und damit die Emissionshöhe zu senken.

Auf der Langstrecke wird sich die 2007 durch den Airbus A380 eingeleitete Phase der Effizienzsteigerung durch weitere Auslieferungen des Flugzeugs sowie ab 2009 durch den Markteintritt der Boeing 787 verstärken. Ab 2013 wird die Airbus A350 XWB den Kerosinverbrauch pro Passagier weiter senken. Derzeit sind keine neuen Flugzeugmodelle absehbar, die den Technologiestand der Langstreckenkatgorie mittel- bis langfristig verbessern könnten.

Ingesamt lässt sich damit festhalten, dass heute und kurzfristig verfügbare Technologien in den kommenden 20 Jahren schrittweise Einzug in den weitweiten Flugzeugmarkt erhalten werden. Bei den Schritten handelt es sich ausschließlich um evolutionäre Weiterentwicklungen bestehender Technologien. Revolutionäre Sprünge sind nicht darunter.

Diese wären auch unter der für 2030 angenommenen Drucksituation des Upper Bound Szenarios (UBS) kurzfristig nicht zu erwarten. Die Erneuerung der globalen Flugzeugflotte würde durch das UBS jedoch begünstigt. Mit welcher Geschwindigkeit Fluggesellschaften neues Fluggerät in ihre Flotte aufnehmen könnten, hänge maßgeblich von der Auftragslage und den Produktionskapazitäten der Flugzeughersteller ab. Im Gegensatz zu den Fluggesellschaften könnten die Hersteller so von dem Druckaufbau des UBS profitieren.

Analog zu 4.2.1. dürfte der Wegfall des externen Drucks im Lower Bound Szenario die globale Flottenentwicklung kaum beeinflussen. Die Anschaffung neuer Flugzeuge würde dann ausschließlich auf ökonomischen Überlegungen (Kosteneinsparung bzw. Expansion) basieren.

### 4.2.3. Visionäre Operationskonzepte

Im Rahmen der bisherigen Diskussion operativer (Triebwerkswäsche) und strategischer (Flottenentwicklung) Optionen wurden Zeithorizonte bis etwa 2030 betrachtet. Anhand der Luftbetankung sowie des Formationsfluges werden nun zwei Beispiele für visionäre Operationskonzepte behandelt, deren Umsetzung nicht vor Beginn der zweiten Hälfte des Jahrhunderts zu erwartet ist. Dies liegt vor allem an den erheblichen Herausforderungen, die mit den genannten Konzepten verbunden wären. Hierauf wird folgend überblicksartig eingegangen.

Im militärischen Bereich ist die Luftbetankung seit geraumer Zeit integraler Bestandteil luftgestützter Kampfeinsätze (siehe Smith 1998).<sup>119</sup> Anders als bei militärischen Manövern, die meist auf eine Reichweitenverlängerung kleinerer Kampfflugzeuge abzielen, könnte die Luftbetankung in ziviler Anwendung treibstoffsparende Potenziale eröffnen (Smith 1998:1, Nangia und Palmer 2007:1). Der Ansatz basiert auf der Annahme, dass Langstreckenflüge durch eine luftgestützte Betankung in kürzere Strecken von etwa 5 500 km unterteilt werden könnten und damit der Einsatz kleinerer Flugzeuge ermöglicht würde (Nangia 2007:8). Besonders die treibstoffintensive Startphase der heutigen Langstreckenflugzeuge (vgl. 4.2.2.) könnte durch eine deutliche Reduzierung des Startgewichts (folgend TOW für Take-Off Weight, genannt) abgeschwächt werden. Am Beispiel einer Boeing B757-300 (maximales TOW 122 t) und einer Airbus A330-200 (maximales TOW 230 t) errechnete Nangia, dass unter günstiger Parameterkonstellation (Zeitpunkt der Betankung, Verbrauch des Tankflugzeuges, Missionslänge, etc.) eine Treibstoffersparnis von 30 bis 50 Prozent gegenüber der konventionellen Bewältigung der Strecke zu erwarten ist (2007:8). Im Vergleich zu den übrigen in dieser Arbeit besprochenen Einzelmaßnahmen, ist dies ein sehr hoher Wert.

Es stellt sich daher die Frage, aus welchen Gründen die Luftbetankung nicht bereits Einzug in die zivile Luftfahrt erhalten hat. Die Antwort hierauf ergibt sich aus den komplexen Herausforderungen, die es im Vorfeld einer erfolgreichen Implementierung des Verfahrens zu bewältigen gilt. Angefangen bei der Entwicklung der technischen Systeme über weitreichende Veränderungen des

---

<sup>119</sup> Bei dem international auch als „Inflight“ bzw. „Aerial Refueling“ oder „Air-to-Air Refueling“ bezeichneten Vorgang versorgt ein Tankerflugzeug (tanker) über eine ausfahrbare Betankungssonde ein zweites Flugzeug (receiver) in der Luft mit Treibstoff (Klußmann 2007:285).

Luftverkehrsmanagement und der Zertifizierung, bis hin zu der ökonomischen und gesellschaftlichen Akzeptanz der Luftbetankung, sind heute zentrale Punkte ungeklärt. Aufbauend auf der Erfahrung und Technologie der militärischen Luftfahrt wird es für prinzipiell möglich gehalten, Betankungssysteme auch auf den zivilen Luftverkehr zu adaptieren (Bennington und Visser 2006:366). Ansätze für kleinere Flugzeuge im Hinblick auf die abgestimmte Positionierung des Tankers und des Empfängerflugzeugs über GPS (Global Positioning System) existieren bereits (siehe beispielsweise Jackson et al. 2007). Deutlich schwieriger werden die nötigen Anpassungen des Treibstoffsystems an dem zu betankenden Flugzeug ausfallen. Geht man davon aus, dass sich die technische Lücke schließen lässt, müsste das zukünftige internationale – da vor allem Langstreckenflüge betroffen wären – Luftverkehrsmanagement die erhöhte Komplexität durch die Tankvorgänge verkraften. Hauptabschnitt 4.3. gibt am Beispiel der Neuordnung des europäischen Luftverkehrsmanagements einen Eindruck davon, wie groß diese Aufgabe ausfallen dürfte. Hinzu kommt die in Kapitel zwei erwartete starke Zunahme des Flugverkehrsaufkommens. Es sei hier jedoch auch darauf hingewiesen, dass die Luftbetankung durch den Einsatz einer größeren Anzahl von Kurz- bis Mittelstreckenflugzeugen, Regionalflughäfen an Bedeutung gewinnen könnten und so möglicherweise in der Lage wäre, die zentralen Flughafenkreuze zu entlasten. Sollte sich die sicherheitsrelevanten und damit zertifizierungstechnischen Fragen als beantwortbar erweisen, müssten geeignete Wirtschaftsmodelle entwickelt werden. Letztlich bleibt es jedoch fraglich, ob sich eine breite Akzeptanz der Flugpassagiere gegenüber der Luftbetankung schaffen ließe.<sup>120</sup>

In engem Zusammenhang zu der Luftbetankung steht der Ansatz des Formationsfluges. Als eine der ersten wiesen Jenkinson et al. 1995 darauf hin, dass der vom Militär bereits angewendete Formationsflug auch in der zivilen Luftfahrt in der Lage wäre „substantial savings in cruise fuel usage“ (1995:1) zu erzielen und sich weitere Forschungen in diese Richtung als vielversprechend erweisen könnten. Bei Testflügen mit zwei Kampfflugzeugen (Typ F/A-18) im Auftrage der NASA (National Aeronautics and Space Administration) bemerkten Hansen und Cobleigh: „Formation flight drag reduction could be of most interest to improve cruise performance of larger military or commercial aircraft“ (2002:2). In einer späteren Studie zeigte die NASA, dass sich eine V-Form, ähnlich wie bei Zugvögeln, als

---

<sup>120</sup> Im Rahmen des UBS werden weitere Einschätzungen zu einer möglichen Integration der Luftbetankung in den zivilen Luftverkehr getroffen.

besonders geeignet erwies, den Luftwiderstand der Verfolgerflugzeuge (trail aircraft) zu reduzieren. Eine um 10 bis 15 Prozent hintereinander angeordnete Überschneidung der Flügel des führenden Flugzeugs (leading aircraft) und des Verfolgers ergab die höchsten Reduzierungen des Luftwiderstandes (Vachon et al. 2003:17). Abbildung 4.13. zeigt eine solche Anordnung am Beispiel eines größeren und zweier kleinerer Flugzeuge. Durch diese Formation könnte der Luftwiderstand der Verfolgerflugzeuge um 30 und mehr Prozent gesenkt werden, wodurch sich eine Reichweitenverlängerung der Formation um zehn bis 15 Prozent gegenüber der formationslosen Distanzbewältigung ergeben würde (Nangia 2007:8). In der Praxis könnten mehrere Flugzeuge von einem Flughafen oder aus einer Region starten, eine Formation aufnehmen und diese kurz vor Zielerreichung wieder verlassen bzw. auflösen (vgl. Cléaz-Savoyen 2004:6ff.). Ein Streckenbeispiel mit Startpunkt Memphis und den Zielflughäfen San Diego, Los Angeles und San Francisco zeigt, dass eine temporäre Formationsaufnahme den gesamten Treibstoffkonsum um etwa zehn Prozent verringern würde (Gouldstone 2004:6).

Die Integration dieses Operationskonzepts in den kommerziellen Luftverkehr scheiterte bisher vor allem an dem damit verbundenen Sicherheitsrisiko. Abbildung 4.13. vermittelt einen Eindruck, wie dicht gestaffelt die Formation auftreten müsste, um nennenswerte Einsparungspotenziale zu ermöglichen. Nangia (2007) verwendete für seine Berechnungen ein Verhältnis von horizontalem Flügelabstand zwischen führendem und folgendem Flugzeug (in der Abbildung Strecke a) und Flügelspannweite des führenden Flugzeuges (b) in Höhe von 1,45.

Für eine Airbus A330 mit einer Flügelspannweite von 60 Metern würde damit der horizontale Abstand zwischen den beiden Flugzeugen (c) deutlich weniger als 87 Meter betragen.<sup>121</sup> Dieses stark vereinfachte Rechenbeispiel verdeutlicht die nötige Dichte, die für eine effiziente Flugformation erforderlich ist. Zum Vergleich sei angeführt, dass der im heutigen Flugverkehr gültige horizontale Mindestabstand für zwei Flugzeuge auf gleicher Flughöhe mindestens neun km beträgt (FAA 2008b:242, siehe auch Doshi et al. 2000). Bereits im militärischen Bereich erprobte Systeme müssten stark weiterentwickelt werden, um Formationsflüge für größere kommerzielle Flugzeuge zu automatisieren und damit beherrschbar zu machen.

---

<sup>121</sup> Von den 87 Metern gilt es sowohl die Strecke zwischen Flügel und Ende des führenden Flugzeuges sowie die Strecke zwischen Flugzeugspitze und Flügel des Verfolgerflugzeuges zu subtrahieren.

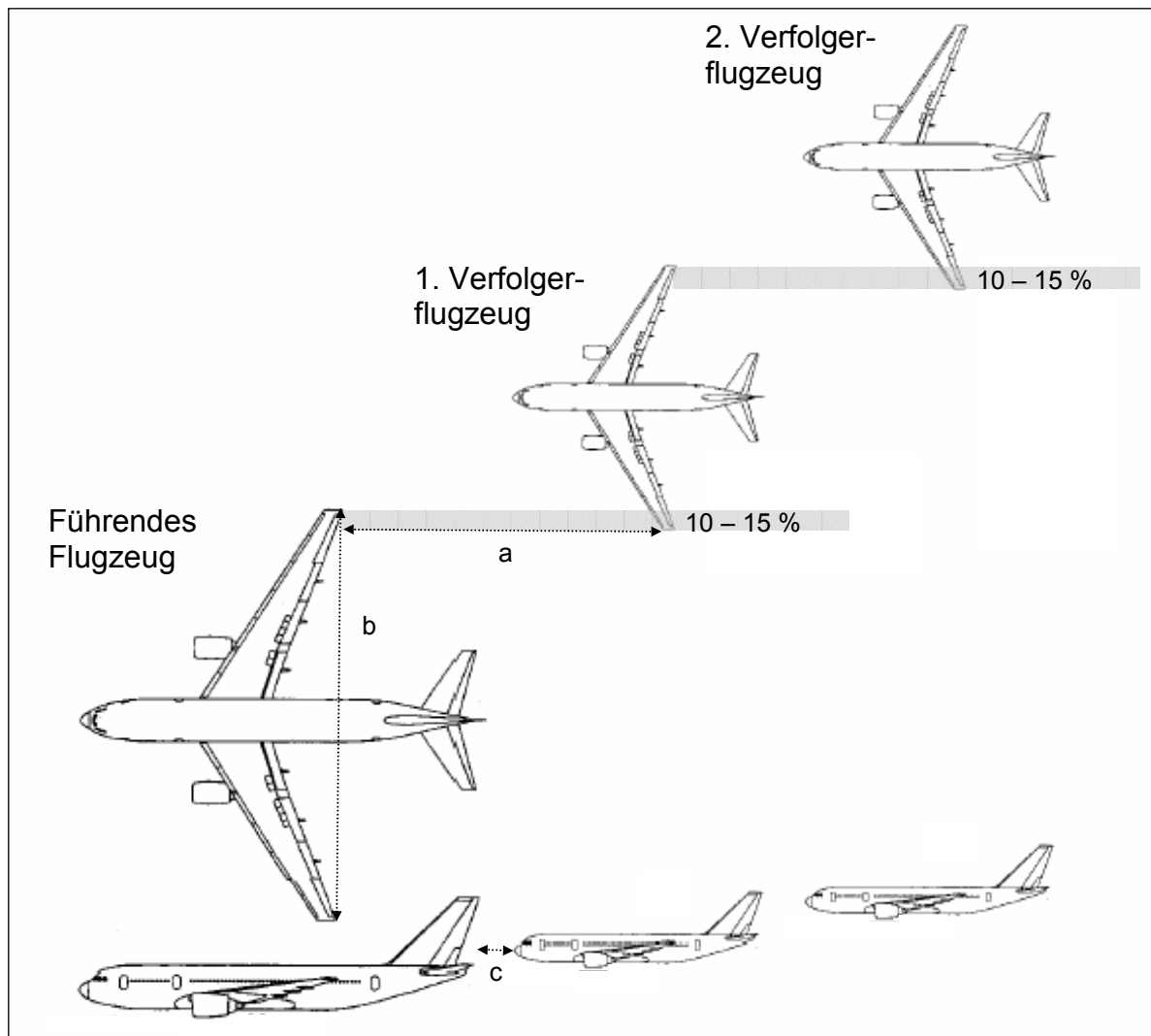


Abb. 4.13.: Beispiel einer treibstoffsparenden Formation für Zivilflugzeuge unterschiedlicher Größe. (Quelle: Eigene Darstellung nach Nangia 2007:17 und Vachon et al. 2003:17)

Analog zu der Luftbetankung müssten dann Fragen nach der ökonomischen Umsetzbarkeit und gesellschaftlichen Akzeptanz des Formationsfluges beantwortet werden. Als eine besondere Herausforderung dürfte sich die Anpassung des Flugverkehrsmanagements erweisen.

Angesichts der Summe und des Umfangs der Probleme, die es zu lösen gilt, werden sowohl die Luftbetankung als auch der Formationsflug derzeit zu Recht als visionäre Operativkonzepte bezeichnet. Die Frage ob, wann und in welcher Form die prinzipiell viel versprechenden Konzepte kommen könnten, wird nun im Rahmen des Szenarienansatzes weiter diskutiert.

Um die Konzepte der Luftbetankung und des Formationsflugs umzusetzen und in den realen Flugbetrieb zu integrieren, ist ein hohes Maß an „thinking out of the box“ (Nangia 2007:5) notwendig. Dieses „über den Tellerrand hinaus schauen“ erfordert



ein besonderes Umfeld. In dem Lower Bound Szenario (LBS) ist der Druck, dem Politik und Industrie 2030 ausgesetzt sind im Vergleich zur Situation heute, geringer. Da es bereits heute fraglich ist, ob die Konzepte jemals in der Praxis zum Einsatz kommen, darf geschlussfolgert werden, dass dieser unter LBS Bedingungen zusätzlich unwahrscheinlich bis ausgeschlossen wäre.

Der hohe Druck des Upper Bound Szenarios (UBS) könnte hingegen eine so große Nachfrage nach treibstoffeffizienteren Operationsverfahren kreieren, dass die Forschung in Richtung Luftbetankung und Formationsflug intensiviert würde. Technisch gilt die Lösung der Konzept Herausforderungen schon heute als möglich (siehe oben). Eine breite finanzielle Förderung vorausgesetzt, könnten zivile Systeme so bereits kurzfristig Marktreife erreichen (vgl. Nangia 2008:3ff.). Durch eine parallele Ausrichtung der Entwicklung von Positionierungs- und Autopilotgeräten sowohl auf die Luftbetankung als auch den Formationsflug, ließen sich Skaleneffekte erzielen und Win-Win-Situationen schaffen. Sollte sich die Einführung der Luftbetankung abzeichnen, die aufgrund der größeren technischen Herausforderungen (Betankungssystem des Empfängerflugzeuges) wahrscheinlich nach dem Formationsflug erfolgen würde, sind zwei ökonomische Modelle denkbar. Einerseits könnten die Fluggesellschaften eigene Tankerflotten betreiben oder andererseits (besonders im Fall kleinerer Betreiber) die Betankung als Service bei einem dritten Anbieter einkaufen. Die operative Maßnahme des Formationsfluges könnten Fluggesellschaften auf hoch frequentierten Langstrecken mit Flugzeugen der eigenen Flotte oder im Rahmen von Allianzen (Stichwort „Star Alliance“ und „Sky Team“) einführen. Sollten sich Luftbetankung und Formationsflug im globalen Luftverkehr (oder zunächst in Pilotregionen) etablieren, könnten beide Konzepte in Kombination verwendet werden. Die Kapazität größerer Tankflugzeuge reicht schon heute aus, um innerhalb einer Mission mehrere Tankvorgänge durchzuführen. Denkbar wäre damit prinzipiell auch die Betankung einer ganzen Formation.<sup>122</sup> Selbst unter UBS Bedingungen würde ein so massiver Eingriff in die Organisation des Luftverkehrs aufgrund der wiederholt angesprochenen Herausforderungen jedoch nicht vor Anfang bis Mitte der zweiten Hälfte dieses Jahrhunderts zu erwarten sein.

---

<sup>122</sup> Darauf weist auch Nangia hin. Er betont zudem die Eignung des Blended Wing Body (vgl. 4.1.3.) für die besprochenen Konzepte (2007:8).

### **4.3. Infrastrukturelle Neuordnung des europäischen Luftraums durch den „Single European Sky“**

Der Single European Sky (SES) ist das „größte Klimaschutzprojekt der Luftfahrt in Europa“ (Deutsche Lufthansa 2008a:32). Bevor diese Aussage am Ende dieses Kapitels (unter 4.3.3.) bewertet wird, soll zunächst 4.3.1. einen Überblick über die Schwächen des europäischen Luftraums und den daraus resultierenden Handlungsbedarf geben. Der darauf folgende Abschnitt 4.3.2. beschreibt den SES als designierte Antwort auf die zuvor identifizierten Ineffizienzen. Neben der Diskussion der oben angeführten Aussage wird in 4.3.3. abschließend der Versuch unternommen, den SES einer kritischen Betrachtung zu unterziehen sowie Einschätzungen, auch unter Berücksichtigung des Szenarienansatzes, über den weiteren Verlauf des Projektes zu treffen.

#### **4.3.1. Strukturelle Ineffizienz des europäischen Luftraums**

Belgien, die Bundesrepublik Deutschland, England, Frankreich, Luxemburg und die Niederlande gründeten 1960 die autonome Organisation „Eurocontrol“ mit der Absicht einen „single upper airspace“ (Eurocontrol 2008b) zu schaffen.<sup>123</sup> Drei internationale Kontrollzentren sollten einen einheitlichen europäischen Luftraum überwachen. Bis heute ist es nicht gelungen, dieses Ziel zu verwirklichen. Lediglich kleinere Teilerfolge konnten verzeichnet werden. So kontrolliert das Upper Area Control Center in Maastricht seit 1972 den (zivilen) Luftraum der Benelux Staaten (Belgien, Luxemburg, Niederlande) sowie Norddeutschlands (Eurocontrol 2008b).<sup>124</sup> Hiervon abgesehen ist der europäische Luftraum heute weiterhin stark parzelliert (siehe Karte 4.1.).<sup>125</sup>

---

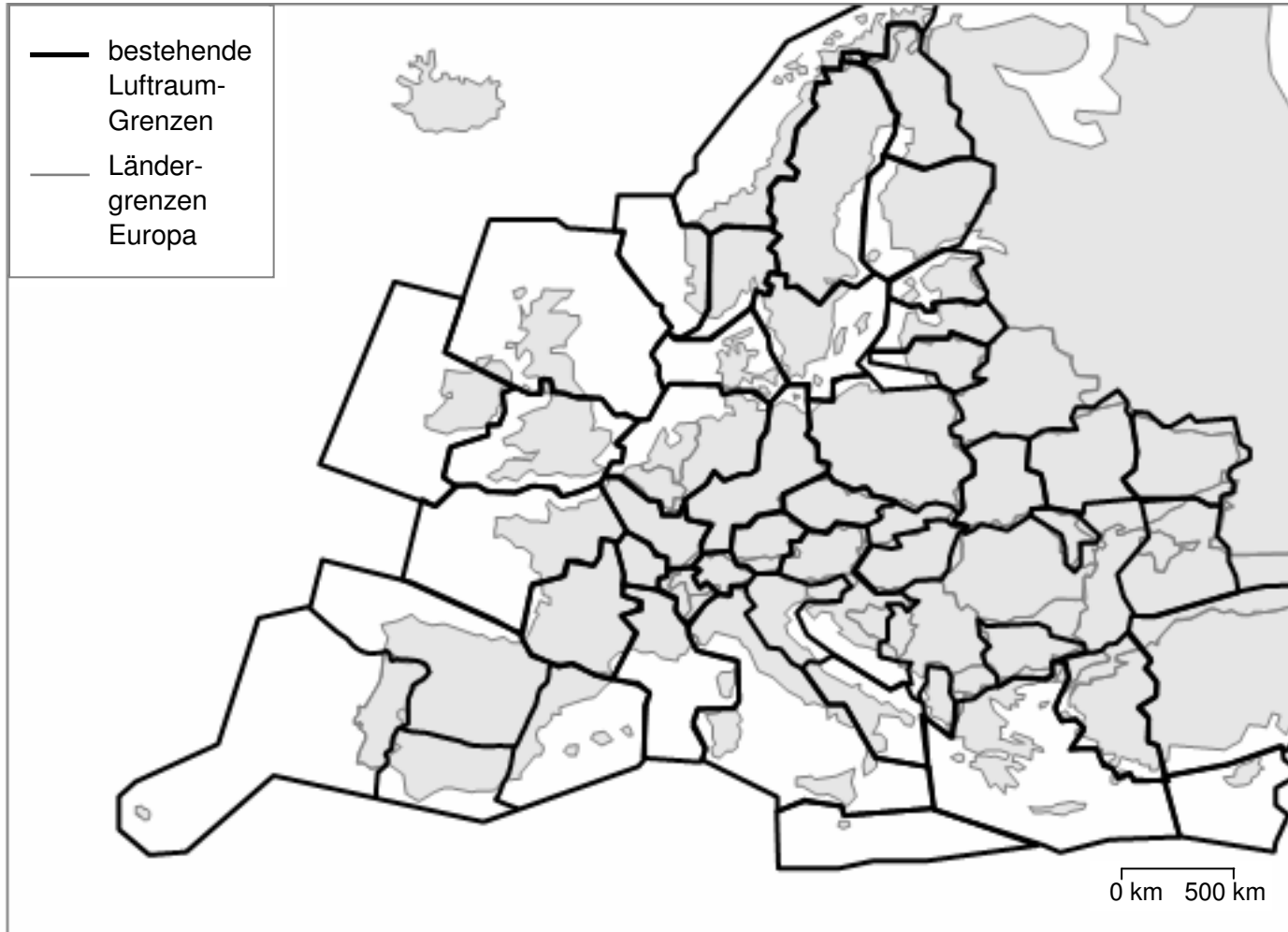
<sup>123</sup> Der „upper airspace“ umfasst die Reiseflughöhen (beginnend ab etwa 7,5 km Höhe), im Gegensatz zum „lower airspace“, in dem der Steig- bzw. Sinkflug stattfindet (vgl. Oster und Strong 2007:64).

<sup>124</sup> Als weiterer Teilerfolg kann die Gründung des Central Route Charges Office (CRCO) gesehen werden, welches im Auftrag von Eurocontrol die europaweiten Fluggebühren erhebt und verwaltet (Eurocontrol 2008c).

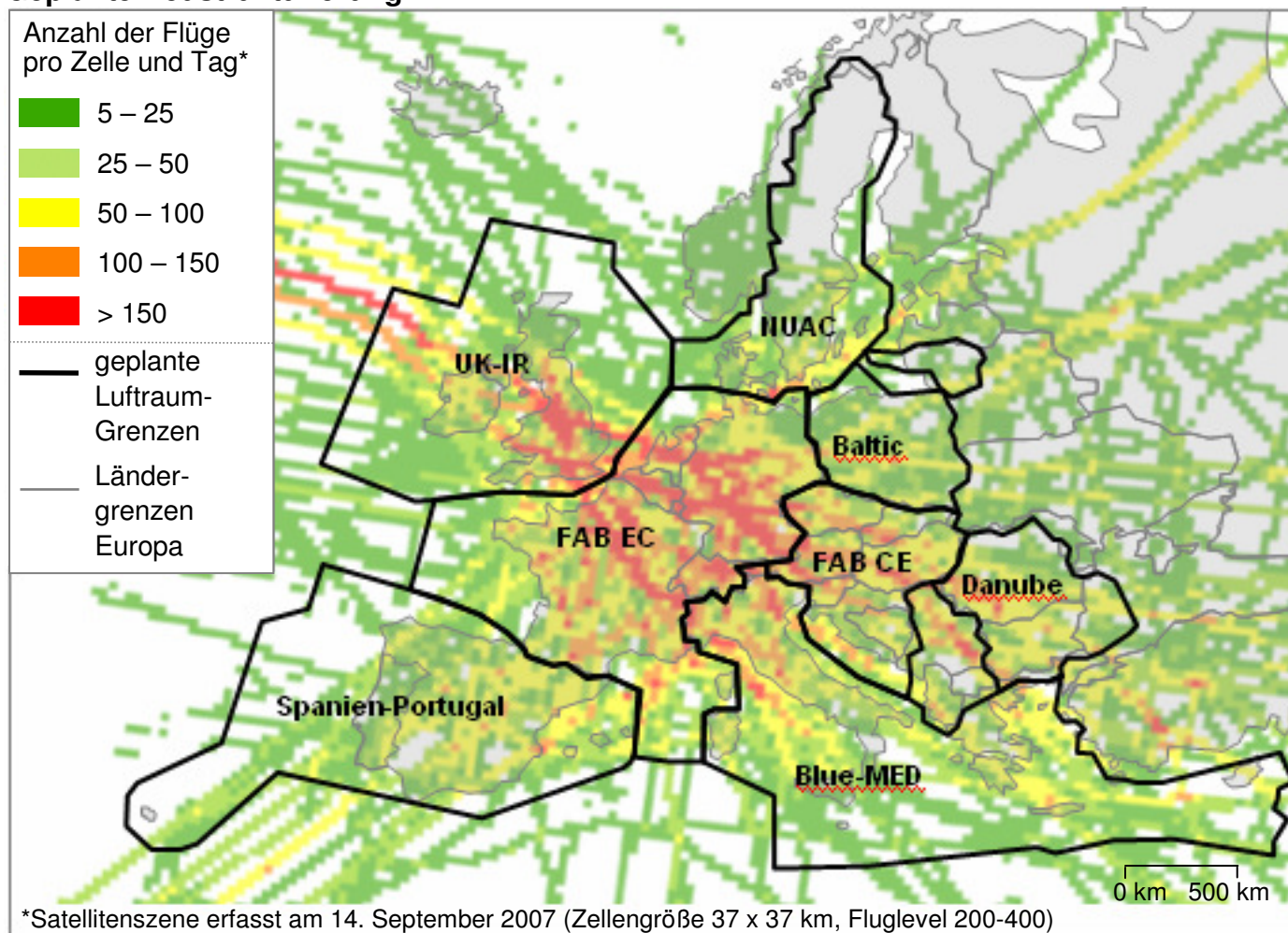
<sup>125</sup> Anmerkung zu Karte 4.1.: Fluglevel 200-400 entspricht einer Höhe von etwa 6 bis 12 km (20 000 bis 40 000 Fuß). Siehe hierzu auch Baumgartner 2007:15f.

# Struktur des europäischen Luftraums

## Struktur heute



## Geplante Neustrukturierung



## Funktionale Luftraumblöcke (FABs)

<b>UK-IR</b> Großbritannien Irland	<b>FAB EC</b> Deutschland Niederlande Luxemburg Frankreich Schweiz Belgien	<b>FAB CE</b> Tschechische Republik Bosnien-Herzegowina Slowenien Österreich Slowakei Kroatien Ungarn	<b>Baltic</b> Litauen Polen	<b>Blue Med</b> Griechenland Zypern Italien Malta	<b>Spanien-Portugal</b> Spanien Portugal
<b>NUAC</b> Schweden Dänemark			<b>Danube</b> Rumänien Bulgarien		

Janpeter Schilling, August 2008, erstellt mit Arc GIS 8 (Quelle: PRC 2008a:38, PRC 2008b:58, ESRI 2002)

In Europa wird die Überwachung des Luftraums von 47 verschiedenen Flugsicherungsdienstleistern (Air Navigation Service Providers, kurz ANSP) und 60 Kontrollzentralen durchgeführt (Tab. 4.4.).<sup>126</sup> Die USA dagegen überwachen einen vergleichbar großen Luftraum sowie ein ähnlich hohes Verkehrsaufkommen mit 20 Kontrollzentren und nur einem Flugsicherungsdienstleister (ebd.).

	<b>Europa</b>	<b>USA</b>
<b>Luftraum (in Million km<sup>2</sup>)</b>	10,5	9,8
<b>Überwachte Flüge (in Millionen)</b>	10,1	10,7
<b>Flugsicherungsdienstleister (zivil und militärisch)</b>	47	1
<b>Kontrollzentren</b>	60	20

Tab. 4.4.: Der Luftraum Europas und der USA. Alle Angaben für 2007. (Quelle: Eigene Zusammenstellung auf Basis von FAA 2007:1, US Department of Transportation 2008:1, CFMU 2008:2-1, Deutsche Lufthansa 2008b:2, Europäische Kommission 2008:7)

Die Zerstückelung des europäischen Luftraums führt über eine erhebliche Minderung der Flugstreckeneffizienz zu steigenden wirtschaftlichen sowie umweltrelevanten Kosten. Unter der Flugstreckeneffizienz ist dabei die Differenz zwischen der tatsächlich zurück gelegten Strecke und einer optimalen, ungehinderten (und damit theoretischen) Flugbahn zu verstehen. Hierbei muss betont werden, dass die optimale Flugbahn bzw. Strecke von einer Einzelperspektive ausgeht, die keine weiteren Faktoren (Sicherheit, übrige Kapazitäten, usw.) in Betracht zieht. Sie ist daher lediglich als Referenz zu verstehen, die weder erreichbar noch erstrebenswert ist (PRC 2008b:54). Die Flugstreckeneffizienz setzt sich aus zwei Komponenten in der Luft (horizontal, vertikal) sowie zwei Komponenten am Boden (Terminalbereich, Rollfeldbewegung) zusammen. Hierbei gilt die horizontale Flugstreckeneffizienz als am besten verstanden. Die vertikale Komponente wurde 2007 von der zuständigen Kommission für Leistungsüberprüfung (Performance Review Commission, PRC) zum ersten Mal bewertet und bedarf weiterer Untersuchung. In noch stärkerem Maße gilt dies für die Bodenkomponten, deren Einschätzung ebenso am Anfang steht und daher mit großen Unsicherheiten behaftet ist (PRC 2008b:63).

Verglichen mit dem beschriebenen Optimum war jeder 2007 im europäischen Luftraum durchgeführte Flug im Durchschnitt 48,9 km (5,8 Prozent) zu lang. Mit 33,4 km (4,0 Prozent) entstand dabei der Großteil des Umweges in der Luft (gegenüber

<sup>126</sup> Allein die Deutsche Flugsicherung betreibt vier Kontrollzentralen (DFS 2008). Die eingesetzte Technik (unter anderem der UKW-Funk) in Europa ist dabei meist 30 bis teilweise 60 Jahre alt (Europäische Kommission Generaldirektion Energie und Verkehr 2005:4).

15,4 km bzw. 1,8 Prozent am Boden). Durch die zusätzlich geflogene Strecke verlängert sich die Flugzeit um etwa 7 bis 12 Minuten (PRC 2008b:63).<sup>127</sup> Für die hier vorliegende Arbeit ist jedoch von größerer Bedeutung, dass durch die Umwege derzeit bis zu einer halben Tonne Kerosin pro Flug unnötig verbrannt wird (siehe Tab. 4.5.).

	<b>Auswirkung</b>		
	<b>Zeit in Min.</b>	<b>Kerosin</b>	
		<b>in kg</b>	<b>in %</b>
<b>Horizontale Flugineffizienz</b>	4	150	3,7
<b>Vertikale Flugineffizienz</b>	0	23	0,6
<b>Terminalbereichbedingte Verspätungen*</b>	<i>2 bis 5</i>	<i>100 bis 250</i>	<i>2,5 bis 6</i>
<b>Rollfeldbedingte Verspätungen*</b>	<i>1 bis 3</i>	<i>13 bis 40</i>	<i>0,3 bis 0,9</i>
<b>Gesamte Flugineffizienz</b>	7 bis 12	300 bis 500	7 bis 11

\*vorläufige Werte

Tab. 4.5.: Zusätzlicher, durchschnittlicher Zeit- und Kerosinverbrauch pro Flug im Eurocontrolgebiet. Zu den Staaten des Eurocontrolgebiets siehe Anhang A. (Quelle: Nach PRC 2008b:64)

Tabelle 4.5. zeigt, in Kombination mit dem aus Kapitel zwei bekannten linearen Zusammenhang zwischen Kerosinverbrauch und Treibhausgasemission, dass ein effizienteres Luftverkehrsmanagement das Potenzial aufweist, die Klimawirksamkeit des europäischen Luftverkehrs um sieben bis elf Prozent zu senken. Besonders deutlich wird die Dimension nach Überführung der relativen Zahlen in absolute Werte. Ausgehend von den 5,7 Milliarden Tonnen Kohlendioxid-Äquivalente, die 2006 insgesamt im Eurocontrolgebiet (vollständige Liste der 38 Länder siehe Anhang A) emittiert wurden, fallen etwa 171 Millionen Tonnen (drei Prozent) auf den Luftverkehr (Abb. 4.14.).<sup>128</sup> Dem zu Folge könnte ein maximal optimiertes Luftverkehrsmanagement die Kohlendioxidemissionen der Luftfahrt jährlich um rund 12 bis 19 Millionen (sieben bzw. 11 Prozent von 171 Millionen Tonnen) senken. Abbildung 4.14. stellt den Aufbau der vollzogenen Rechnung schematisch dar. Ergänzend zeigt die Abbildung die Hierarchie der zentralen Reduktionsziele in Abhängigkeit ihrer Wirkungsebenen. Es sollte erneut darauf hingewiesen werden, dass es sich bei dem nicht unwesentlichen Einsparpotenzial um die Differenz

<sup>127</sup> Die durchschnittliche Verspätung (Differenz zwischen geplanter und tatsächlicher Ankunftszeit) im europäischen Luftraum lag 2007 bei 1,6 Minuten (PRC 2008b:52).

<sup>128</sup> Vgl. hierzu auch 2.2.3.

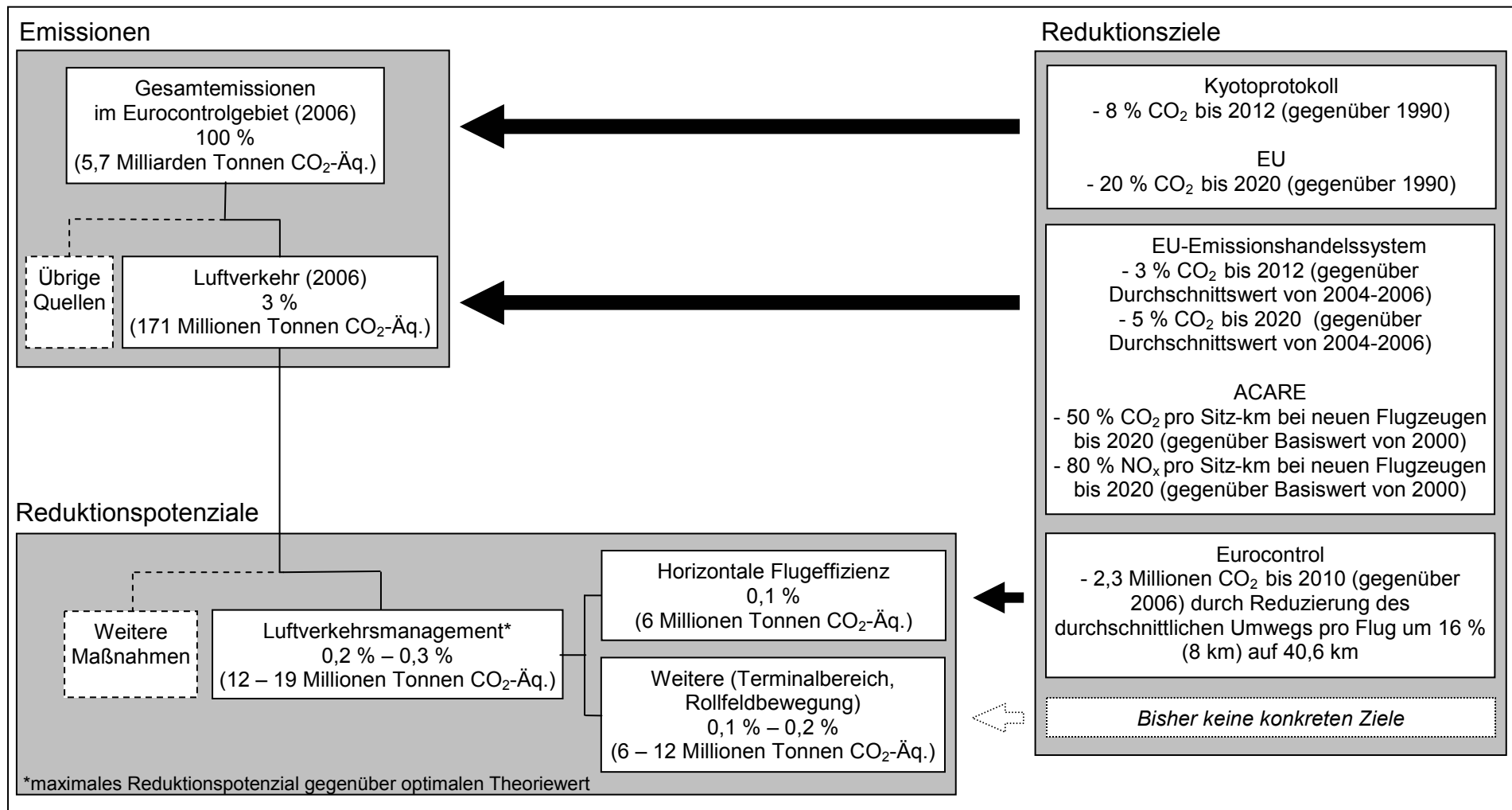


Abb. 4.14.: Schematische Darstellung der Emissionen, Reduktionsziele und Reduktionspotenziale im Eurocontrolgebiet. Die zugehörigen Staaten des Eurocontrolgebiets sind in Anhang A aufgeführt. (Quelle: Eigene Darstellung nach PRC 2008b:68 ergänzt durch EEA 2008:15, European Parliament 2008a, ACARE 2002a:20)

zu einem nicht erreichbaren Theoriewert handelt (siehe oben). Die tatsächlich zu realisierende Kohlendioxideinsparung dürfte weit unter dem Maximalwert von 19 Millionen Tonnen jährlich liegen. Dieser Eindruck bestätigt sich bei der Betrachtung der Eurocontrol-eigenen Reduktionsziele, die um Faktoren unter den 19 Millionen Tonnen Kohlendioxid-Äquivalenten liegen. Gegenüber 2006 soll der Umweg pro Flug bis 2010 jährlich um zwei km gesenkt werden. In den vier Jahren sollen so insgesamt 2,3 Millionen Tonnen Kohlendioxid eingespart werden (siehe Tab. 4.6.).

	2006	2007	2008	2009	2010	Gesamt
<b>Anzahl an Flügen (in Millionen)</b>	9,6	10,0	10,4	10,8	11,2	
<b>Angestrebter Grenzwert für für zusätzlich geflogene Strecken (in km/Flug)</b>	48,6	46,6	44,6	42,6	40,6	
<b>Distanzreduktion gegenüber 2006 (in km/Flug)</b>		- 2	- 4	- 6	- 8	
<b>Gesamte Distanzeinsparung (in Million km)</b>	0	- 20	- 42	- 65	- 90	- 216
<b>Kosteneinsparung (in Million Euro)</b>	0	- 100	- 210	- 320	- 450	- 1 080
<b>Kohlendioxideinsparung (in Million Tonnen)</b>	0	- 0,2	- 0,4	- 0,7	- 1,0	- 2,3

Tab. 4.6.: Kosten- und Kohlendioxideinsparungspotenziale durch Eurocontrol Zielvorgaben. (Quelle: Nach PRC 2008c:68)

Ob dieses Ziel termingerecht erreicht werden kann, darf jedoch bezweifelt werden. Die zuständige Kommission für Leistungsüberprüfung bemerkt hierzu bereits heute: „Achieving this target will be challenging within the expected timeframe and it was already missed in 2007“ (PRC 2008c:67). Vergangenes Jahr wurde das Ziel (46,6 km/Flug) um 2,3 km überschritten (PRC 2008b:55). Die Verfehlung des Ziels wiegt angesichts der vergangenen Ölpreissteigerung (vgl. 4.4.1.) aus betriebswirtschaftlicher Sicht besonders schwer. Zusätzlich liegen die Kosten für die Luftverkehrskontrolle pro Flugstunde in Europa um etwa dreiviertel höher als in den USA (IATA 2008i).<sup>129</sup>

<sup>129</sup> Der Hintergrund hierzu wird im nächsten Abschnitt näher erläutert.

### 4.3.2. Lösungsansatz Single European Sky

Der hier vorliegende Abschnitt geht zunächst rein deskriptiv auf die wesentlichen Punkte des Projekts ein. Diese setzen sich aus dem rechtlichen Rahmen (Kernverordnungen), dem operativen Teil (Masterplan) sowie der geplanten Umstrukturierung (funktionale Luftraumblöcke) und der verabschiedeten Erweiterung (Single European Sky II) zusammen. Die kritische Betrachtung der einzelnen Punkte erfolgt gebündelt unter 4.3.3.

Um sich der Zerstückelung des europäischen Luftraums und den beschriebenen Folgeproblemen anzunehmen, initiierte die Europäische Kommission 1999 das Projekt „Single European Sky“ (SES) (Europäische Kommission 1999).<sup>130</sup> Konkret soll der SES dazu beitragen, dass sich der Luftraum an Verkehrsströmen anstelle von nationalen Grenzen orientiert, zusätzliche Kapazitäten frei werden und sich die Gesamteffizienz des Luftverkehrsmanagements erhöht (Eurocontrol 2006). Aus Vertretern der Industrie und Politik wurden diverse „Hochrangige Gruppen“ („High Level Groups“, kurz HLG) gegründet, die durch zahlreiche Studien und Zusammenkommen den administrativen, rechtlichen und technischen Rahmen des SES formulierten. Hierzu wurde 2004 eine Rechtsgrundlage, bestehend aus vier Kernverordnungen, geschaffen.

Die erste („Rahmen“-)Verordnung (549/2004) sieht vor, dass Eurocontrol mit der unterstützenden Forschung und Entwicklung sowie der Ausarbeitung von Richtlinienvorschlägen betraut wird, wo hingegen die Europäische Kommission die rechtliche Bindung sicherstellt. Bei der Formulierung der Vorgaben muss stets ein Konsens zwischen den Mitgliedsstaaten gefunden werden. Die eigentliche Umsetzung der einzelnen Vorgaben bzw. Verordnungen ist Aufgabe von nationalen Aufsichtsbehörden (Europäische Union 2004a).

Kern der zweiten („Flugsicherungsdienste“-)Verordnung (550/2004) ist die funktionale Trennung zwischen den zuvor erwähnten nationalen Aufsichtsbehörden und den Flugsicherungsorganisationen. Dabei sind die Mitgliedstaaten dafür verantwortlich, für eine transparente und unparteiische Arbeit der nationalen Aufsichtsbehörden zu sorgen (Europäische Union 2004b).

Die dritte („Luftraum“-)Verordnung (551/2004) regelt die Ordnung und Nutzung des europäischen Luftraums. Vor allem die Aufteilung des Luftraums in funktionale

---

<sup>130</sup> Zu diesem Zeitpunkt stellte die erhebliche Zunahme der Verspätungen das vorrangige Problem dar (ebd.).



Luftraumblöcke (Functional Airspace Block, kurz FAB) und die Abstimmung von zivilen und militärischen Akteuren über eine gemeinschaftliche Luftraumnutzung stehen hier im Vordergrund. Die Luftraumblöcke sollen sich nicht an nationalen Grenzen, sondern vielmehr an Verkehrsströmen orientieren. In welcher Form und Ausprägung die Luftraumblöcke entstehen, obliegt den nationalen Regierungen, die sich unter Einhaltung von Vorgaben (Einverständnis aller betroffener Parteien, Anhörung der Kommission, etc.), mit Nachbarstaaten zusammenschließen sollen.

Um die Zusammenarbeit zwischen zivilen und militärischen Stellen zu verbessern, soll das Konzept der flexiblen Luftraumnutzung angewendet werden. Im Rahmen dieses Ansatzes soll der für militärische Aktivitäten gesperrte Luftraum, zeitweise und insbesondere während Verkehrsspitzen, für die zivile Nutzung geöffnet werden (Europäische Union 2004c).

Komplettiert wird die Rechtsbasis durch die (Interoperabilitäts-)Verordnung (552/2004), die die nötigen Bedingungen definiert, unter denen die verschiedenen Flugverkehrsmanagementsysteme innerhalb der EU harmonisiert werden sollen. Zudem soll die Interoperabilität der bestehenden Systeme durch den Einsatz neuer Technologien verbessert werden (Europäische Union 2004d).

Um die in den Verordnungen vorgesehenen technologischen, ökonomischen und regulativen Maßnahmen zu synchronisieren sowie erforderliche Verbesserungen zu implementieren, wurde 2005 das Programm „SESAR“ („Single European Sky Air Traffic Management Research“), als operativer Teil des SESs, aufgelegt (SESAR Consortium 2008a). Das zugehörige Konsortium besteht aus den „major stakeholders in European aviation“ (SESAR Consortium 2008b:6), wozu neben den Luftraumnutzern (darunter auch die Deutsche Lufthansa), Flugsicherungsdienste (maßgeblich Eurocontrol), Flughafenbetreiber sowie weitere Beteiligte der militärischen und zivilen Luftfahrt gehören.<sup>131</sup> Neben der Entwicklungsphase („Development Phase“ 2008 bis 2013) und der Errichtungsphase („Deployment Phase“ 2014 bis 2020 und darüber hinaus) setzt sich das SESAR Programm aus einer Definitionsphase („Definition Phase“) zusammen, die im Frühling 2008 nach drei Jahren abgeschlossen wurde. Die zentrale Aufgabe dieser Phase bestand in der Ausarbeitung eines umfassenden Masterplans zur Verbesserung des Luftverkehrsmanagements („Air Traffic Management“, kurz ATM) im europäischen Luftraum (siehe SESAR Consortium 2008b). Da der Masterplan den weiteren Verlauf

---

<sup>131</sup> Eine vollständige Liste findet sich in SESAR Consortium 2008b:5.

des SES bestimmen wird, sollen folgend dessen relevante Aspekte zusammengefasst werden.

Nach Feststellung des Ist-Zustandes (vgl. SESAR Consortium 2006a) einigten sich die beteiligten Akteure, bestehend aus Vertretern von Fluggesellschaften, Flugsicherungsdienstleistern und Flughafenbetreibern, auf gemeinsame „Leistungsziele“ (Performance Targets). Bis 2020 soll danach das Luftverkehrsmanagement gegenüber 2004 so optimiert bzw. erweitert werden, dass es eine Verdreifachung des Verkehrsaufkommens bei gleichzeitiger Halbierung der Servicekosten pro Flug bewältigen kann. Zudem soll sich das Sicherheitsniveau bis 2020 schrittweise erhöhen (SESAR Consortium 2007:8ff.). Zu den klimarelevanten Folgen des Flugverkehrs wird bemerkt: Das Luftverkehrsmanagement „will deliver its maximum contribution to minimise the effect aviation has on the environment“ (SESAR Consortium 2008b:111). Als „maximaler Beitrag“ wird die zehnpromzentige Reduzierung des Treibstoffverbrauchs bis 2020 (gegenüber dem Niveau von 2005) verstanden (ebd. 2008:14).

Auf Grundlage dieser und weiterer Zielvorgaben wurde ein Zielkonzept („ATM Target Concept“ siehe SESAR Consortium 2007) entworfen sowie eine Sequenzstudie („ATM Deployment Sequence“ siehe SESAR Consortium 2008c) durchgeführt. Basierend auf den Ergebnissen dieser Dokumente macht der Masterplan konkrete Vorschläge, wie die genannten Ziele erreicht werden sollen.

Der Gesamtprozess bis 2020 und darüber hinaus wurde hierzu zunächst in sechs Bereitstellungsstufen, die so genannten „Service Level“, unterteilt. Jede Stufe setzte sich aus einer Forschungs- und Entwicklungsphase („Research and Development“, kurz R&D), einer Umsetzungsphase („Implementation“) sowie einer Operationsfähigkeitsphase („Available for Operation“) zusammen. Abbildung 4.15. zeigt die sich teilweise überschneidenden Phasen, ergänzt um die Ziele der jeweiligen Service Level (braune Kästen).

Auf eine nähere Erläuterung der einzelnen Systeme und Verfahren wird hier verzichtet, da sie für die Aussage dieses Abschnitts lediglich von bedingter Relevanz sind. Die Vermittlung eines generellen Verständnisses soll durch die Wiedergabe der wesentlichen Aspekte erreicht werden.

Das Service Level 0 soll die Einführung und Betriebsbereitschaft der bereits entwickelten, optimalen Verfahren („best practices“) gewährleisten. Zu ihnen gehören unter anderen das Anflugverfahren „Continuous Descent Approach“ (CDA), welches

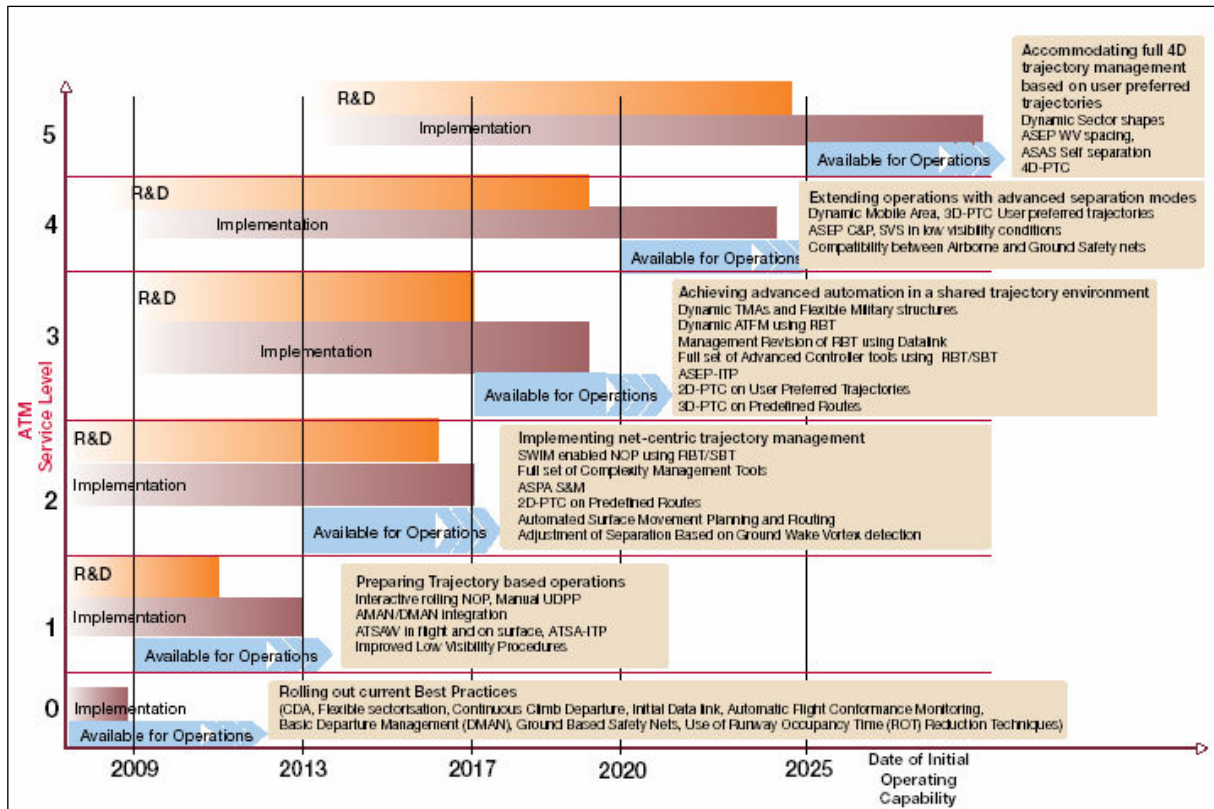


Abb. 4.15.: Übersicht des SESAR Masterplans. (Quelle: SESAR Consortium 2008b:8)

durch einen kontinuierlichen (Segel-)Anflug, den Treibstoffverbrauch sowie die Emissions- und Geräuschentwicklung senkt (SESAR Consortium 2006b:69).<sup>132</sup>

Die Verfahren werden auf Service Level 1 flächendeckend angewendet, um die Grundlage für die Verwirklichung des zentralen Masterplanprinzips („main driving principle“ SESAR Consortium 2007:8) zu schaffen. Dies besteht in der Überzeugung, dass den Anforderungen der Luftraumnutzer (vornehmlich der Fluggesellschaften) stärker Rechnung getragen werden muss. Aus diesem Grund soll sich das zukünftige Luftverkehrsmanagement an den geforderten Flugbahnen bzw. Routen (genannt „Business Trajectory“) und nicht wie heute am Luftraum selbst orientieren (SESAR Consortium 2007:17).<sup>133</sup> Unterstützt wird die Umsetzung dieses Prinzips durch den Netzwerkoperationsplan („Network Operations Plan“, NOP), welcher helfen soll die Balance zwischen Nachfrage und Kapazität zu finden.

<sup>132</sup> In Kombination mit weiteren Anflug- bzw. Abflugsystemen (Arrival- bzw. Departure Manager, AMAN/DMAN) werden solche Effekte bereits heute an einigen europäischen Flughäfen (beispielsweise Frankfurt, München, Madrid, Paris Charles de Gaulle und Zürich) erzielt (vgl. SESAR Consortium 2006b:65).

<sup>133</sup> Zur Zeit wird das Prinzip des „business trajectory“ im Rahmen des „BridgeT Projekt“ zwischen Amsterdam und Stockholm getestet (SANE 2008).

Um den Informationsaustausch zwischen den einzelnen Akteuren zu verbessern, wird im Rahmen des Service Level 2 das „System Wide Information Management“ (SWIM) eingeführt. Damit sollen Informationen nicht nur für Flugkontrollzentrum und Cockpit, sondern auch für einzelne Nutzer über persönliche Einheiten verfügbarer werden (SESAR Consortium 2007:17).

Die Anzahl der kürzesten Strecken soll durch eine quantitative Zunahme der nutzerbezogenen Flugbahnen („user-preferred trajectories“) und die parallele Schaffung der funktionalen Luftraumblöcke erreicht werden (siehe unten). Zudem sollen horizontale Störungen durch neue Arten der Flugbahntrennung und eine präzise Flugbahnfreigabe („Precision Trajectory Clearance“, 2D-PTC) reduziert werden.

Das Service Level 3 erweitert die Flugbahnfreigabe um die vertikale Komponente (3D-PTC), automatisiert diese und stimmt sie weiter mit der militärischen Luftraumstruktur ab.

Die Inhalte der Service Level 4 und 5 sind bisher erst skizziert worden. Im Wesentlichen erweitern sie die eingeführten Systeme und resultieren letztlich in der „4D-Flugbahnfreigabe“ (4D-PTC), die neben der horizontalen und vertikalen auch die zeitliche Komponente (wann genau die Überschneidungen auftreten) berücksichtigt (SESAR Consortium 2007:10). Darüber hinaus enthält der Masterplan konkret auf die Hauptakteure zugeschnittene (Zwischen-)Ziele in Form von Leistungsstufen („Capability Level“). Da das Gelingen des Masterplans wesentlich von den Fluggesellschaften sowie den zivilen Flugsicherungsdienstleistern abhängt, werden die Leistungsstufen nun kurz zusammengefasst.

Für die Fluggesellschaften und Geschäftliche Luftfahrt („Business Aviation“) sind über die erste, bereits abgeschlossene Leistungsstufe, fünf weitere vorgesehen. Die zentralen Aufgaben der ersten Stufen bis 2020 sind die Verbesserung der Boden-Luft-Kommunikation sowie die Schaffung der technischen Voraussetzungen für die „4D-Flugbahnfreigabe“ (siehe oben).<sup>134</sup> Diese soll auf der letzten Leistungsstufe ihre vollständige Betriebsbereitschaft erreichen. Parallel dazu ist die fortschreitende Implementierung der „Luft-zu-Luft“ („air-to-air“) Kommunikationssysteme geplant, die den Informationsaustausch zwischen den Luftraumnutzern verbessern soll (SESAR Consortium 2008b:57).

---

<sup>134</sup> Unter anderem soll hier das Airborne Separation Assistance System errichtet werden, welches hilft den Abstand zwischen Flugzeugen im Luftraum zu optimieren.

Die Leistungsstufen der zivilen Flugsicherungsdienstleister enthalten neben dem gemeinsamen (langfristigen) Ziel der „4D-Flugbahnfreigabe“ die kurz- bis mittelfristige Einführung verbesserter Anflugverfahren (siehe AMAN oben). Unter Anwendung des NOP (Network Operations Plan) sollen zudem Instrumente entwickelt und eingeführt werden, die den Piloten eine freiere Flugroutenwahl ermöglichen (SESAR Consortium 2008b:57).

Um diese Einzelziele zu erreichen und den Masterplan in seiner Gesamtheit zum Erfolg zu führen, sind seitens der Akteure erhebliche finanzielle Aufwendungen nötig. Dabei zeigt Abbildung 4.16., dass die zu tragenden Kosten sehr ungleich verteilt

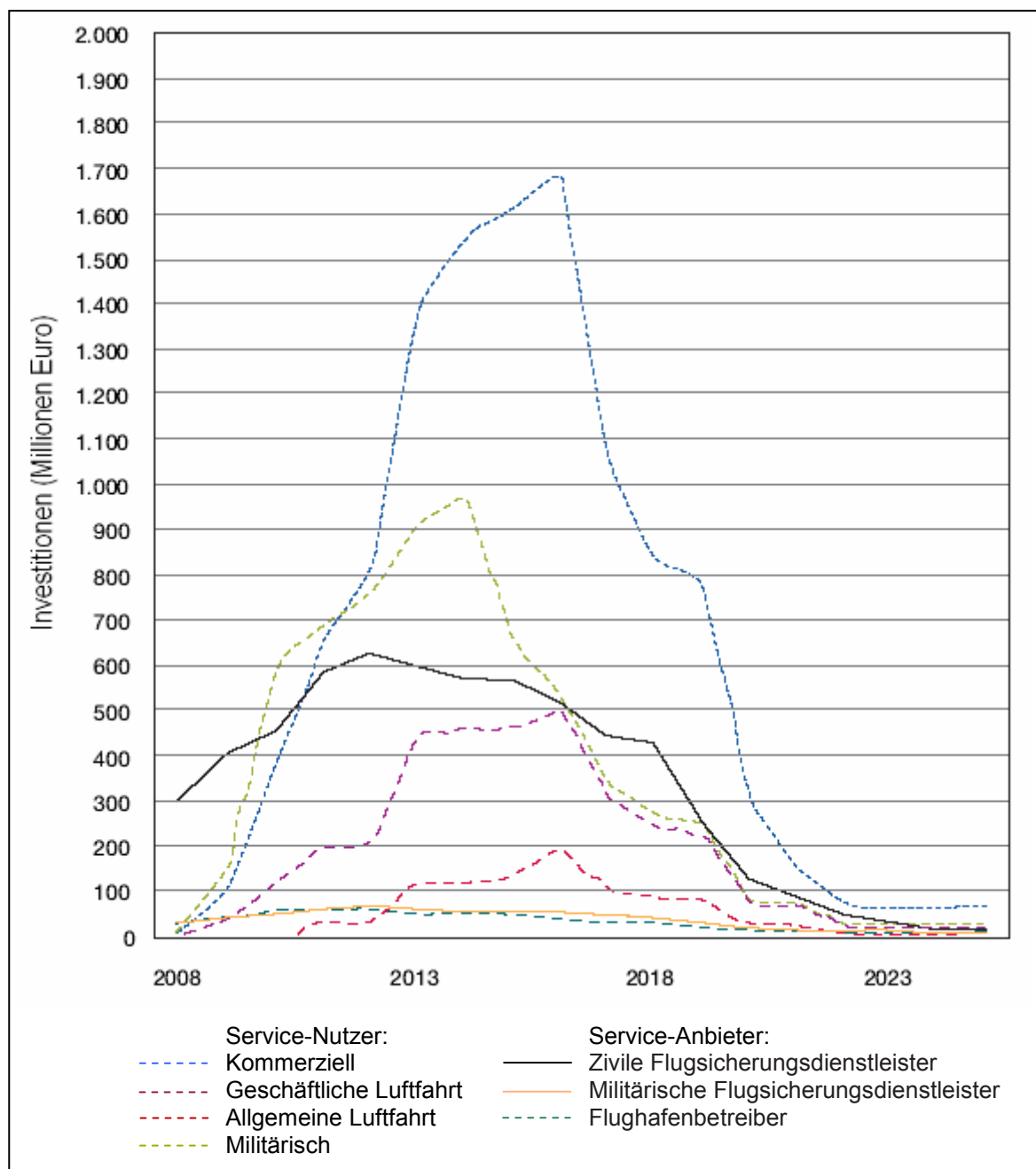


Abb. 4.16.: Nötige Investitionen zur Erreichung der Leistungsstufe 3 nach Akteuren. (Quelle: Übersetzt aus SESAR Consortium 2008b:84)

sind. Während die Flughafenbetreiber und militärischen Flugsicherungsdienstleister mit relativ geringen zweistelligen Millionenbeträgen konfrontiert werden, dürften die nötigen Investitionen die militärischen bzw. zivilen Luftraumnutzer, allen voran die Fluggesellschaften sowie die zivilen Flugsicherungsdienstleister, vor größere Herausforderungen stellen. Bis zur der Leistungsstufe 3 (gegen 2023) werden die Gesamtkosten aller Akteure auf etwa 30 Milliarden Euro geschätzt. Die Fluggesellschaften haben den größten Anteil (ca. 11,5 Milliarden), gefolgt von den militärischen Luftraumnutzern (6,4 Milliarden) und den zivilen Flugsicherungsdienstleistern (ca. 11,5 Milliarden) zu tragen (SESAR Consortium 2008b:84).<sup>135</sup> Die von den Fluggesellschaften aufzubringenden Mittel belaufen sich allein für die erste Leistungsstufe auf rund 580 000 Euro pro Flugzeug (zweite Leistungsstufe 1 300 000 Euro pro Flugzeug, dritte Leistungsstufe 903 000 Euro pro Flugzeug) (SESAR Consortium 2008b:85). Erst ab 2017 wird erwartet, dass der erzielte Nutzen die Kosten übersteigt (ebd. 2008b:88). Die laufenden Kapazitätswachse sowie die Reduzierung der verkehrsmanagementbedingten Verspätung (von 2,2 Minuten auf 0,5 Minuten) sollen den Fluggesellschaften zwischen 2008 und 2020 etwa neun Milliarden Euro einsparen (ebd. 2008b:80). Um diese Gesamteinsparungen sowie zwischenzeitliche „early benefits“ (Bittlinger im Expertengespräch, vgl. Anhang B) zu realisieren, ist die Umsetzung der geplanten funktionalen Luftraumblöcke („Functional Airspace Blocks“, kurz FAB) von zentraler Bedeutung. Basierend auf der 2004 geschaffenen Rechtsgrundlage (siehe Luftraumverordnung oben), sollen die Mitgliedstaaten die „dauerhafte politische Unterstützung“ (Europäische Kommission 2007c:6) sichern, während die Flugsicherungsdienstleister mit der technischen Umsetzung betraut werden. Den Luftraumnutzern wird die Einflussnahme auf den Prozess zugesichert. Der gewählte Ansatz zur Schaffung der Luftraumblöcke wird als Bottom-Up bezeichnet, da die Mitgliedsstaaten als treibende Kraft dafür verantwortlich sind die „Entfragmentierung herbeizuführen“ (ebd.).

Eine im Auftrag der Europäischen Kommission durchgeführte Studie gibt den aktuellen (Zwischen-)Stand der Luftraumblockbildung wieder (PRC 2008a). Karte 4.1. zeigt die geographische Ausdehnung der derzeit geplanten funktionalen Luftraumblöcke und listet die jeweils beteiligten Länder auf. Es wird deutlich, dass es

---

<sup>135</sup> Die übrigen Kosten verteilen sich auf die Geschäftliche Luftfahrt (3,4 Milliarden), die Allgemeine Luftfahrt (940 Millionen) sowie die militärischen Flugsicherungsdienstleister (570 Millionen) und die Flughafenbetreiber (550 Millionen) (ebd.).

sich bei den acht Luftraumblöcken meist um Zusammenschlüsse zweier Nachbarstaaten handelt. In drei Fällen kommt es zu Kooperationen mehrerer Staaten. Hinsichtlich der Attribute: Kontrollierte Gesamtflugstunden, Flugstunden pro Sektor, Arbeitskräfte und Servicekosten ergeben sich zwischen den einzelnen Luftraumblöcken erhebliche Unterschiede. Während der Luftraumblock „Baltic“ stets unter fünf Prozent bleibt, dominiert der wichtigste Luftraumblock „Europe Central“ (EC) die genannten Bereiche fast durchweg mit Werten zwischen 36 und 41 Prozent (PRC 2008a:iv).<sup>136</sup> Anzumerken ist zudem, dass einige Länder (Estland, Finnland Lettland und Norwegen) bisher keinerlei Zusammenschlüsse geplant haben. Weitere Staaten (Albanien, Bulgarien, Rumänien, Kroatien, Mazedonien, Serbien, Montenegro sowie Bosnien und Herzegowina) beteiligen sich an der Initiative „SEE FABA“ (South East Europe Functional Airspace Block Approach), die nach den politischen Unstimmigkeiten zwischen Albanien und Mazedonien jedoch als gescheitert und damit offiziell nicht mehr als funktionaler Luftraumblock gesehen wird (PRC 2008a:61).<sup>137</sup>

Der Zusammenbruch einer gesamten Initiative ist (bisher) ein Ausnahmefall. Dennoch weisen die einzelnen Luftraumblöcke nicht nur hinsichtlich ihrer Eigenschaften, sondern vor allem im Hinblick auf ihren Fortschritt starke Unterschiede auf. Abbildung 4.17. dokumentiert die bisherige Entwicklung der einzelnen Luftraumblock Initiativen und skizziert den geplanten Verlauf.

Als erster wird demnach der Luftraumblock „UK-IR“ 2008 funktionsbereit sein. Ebenfalls weit fortgeschritten ist der zweite nördliche Luftraumblock „NUAC“ (Northern Upper Area Control), der die dichten Lufträume um Kopenhagen und Malmö einschließt. Die bereits zuvor bestehende Ähnlichkeit der operationellen Strukturen sowie der starke politische Wille sowohl auf dänischer als auch schwedischer Seite werden als Hauptgründe für die bisherigen Erfolge gesehen (PRC 2008a:A-12).

Im Gegensatz dazu ist die Zukunft des kleinsten geplanten Luftraumblock Baltic ungewiss. Nach Abschluss der Projektierungsphase kam der Prozess zum Stillstand. Analog zum Scheiterten des SEE FABA ist auch hier die zentrale Hürde politischer Natur. Um effizient arbeiten zu können, müsste der Luftraumblock Baltic den

---

<sup>136</sup> Ausnahme ist das Gebührenerhebungsgebiet. Hier liegt der Luftraumblock Spanien-Portugal (26 Prozent) über dem FAB EC (17 Prozent) (ebd.).

<sup>137</sup> Bulgarien, Rumänien, Kroatien sowie Bosnien und Herzegowina befinden sich bereits in angrenzenden FABs (ebd.).

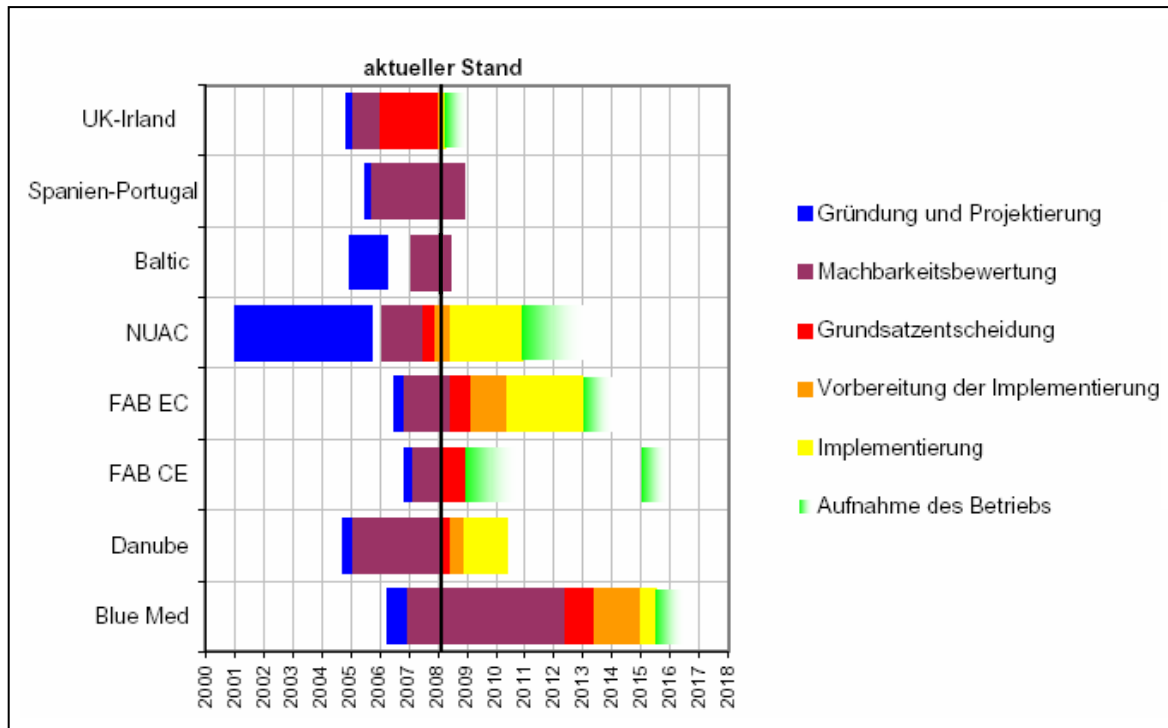


Abb. 4.17.: Aktueller Stand und geplanter Verlauf der funktionalen Luftraumblock (FAB) Initiativen. (Quelle: Übersetzt aus PRC 2008a:vii und PRC 2008a:A-1)

Verkehrsknotenpunkt Kaliningrad einbeziehen. Als russische Exklave ist die Kontrolle des Kaliningrader Luftraums, beispielsweise durch Litauen, jedoch politisch nicht unproblematisch. Zudem ist die Beteiligung Estlands und Weißrusslands weiterhin unklar. Da die Anfang 2007 begonnene Machbarkeitsstudie zum jetzigen Zeitpunkt noch nicht abgeschlossen ist, gestaltet sich der weitere Verlauf offen (PRC 2008a:A-1).

Ähnliches gilt für die Kooperation zwischen Spanien und Portugal. Hier muss ebenfalls die Machbarkeit geklärt werden, bevor weitere Phasen absehbar sind. Die zuständigen Flugsicherungsdienstleister untersuchen derzeit gar die Möglichkeit, für jedes Land einen eigenen Luftraumblock zu entwerfen. Alle weiteren Überlegungen wurden daher zunächst eingefroren (PRC 2008a:A-15).

Die Kernherausforderung der Blue Med Initiative ist die Zusammenarbeit mit den Nicht-EU-Staaten Tunesien und Ägypten, die als Teilhaber bzw. Beobachter in die Planung miteinbezogen werden. Der Sicherheitsaspekt spielt in diesem Fall eine besondere Rolle. Im Nord-Osten grenzt der Blue Med Luftraumblock an die Danube Initiative, dessen ursprüngliche Form neben Bulgarien und Rumänien auch Moldawien, die Türkei und Georgien als Teilnehmer umfassen sollte (PRC 2008a:A-5). Nach den militärischen Auseinandersetzungen zwischen Georgien und Russland



um die Region Südosteuropa (Die Zeit 2008a) erscheint dieser Ansatz vorerst jedoch als kaum realisierbar.<sup>138</sup>

Dem FAB „CE“ (Central Europe, nicht zu verwechseln mit dem FAB EC, Europe Central) scheint es dagegen zu gelingen, mehrere Staaten unter einer Initiative zu vereinen, weswegen er als fortschrittlich gilt (PRC 2008a:A-8). Das Projekt wird stärker von den Staaten als von den Flugsicherungsdienstleistern geführt. Bei der Flugsicherung soll es nicht zur Bildung einer transnationalen Einrichtung kommen, sondern bestehende Ressourcen umfunktioniert werden. Genauere Vorstellungen für die Implementierung und die Vorbereitung darauf wurden noch nicht veröffentlicht. Umso erstaunlicher ist es, dass bereits Zeitpunkte für den Operationsbeginn (je nach zugrunde gelegtem Szenario) ab 2009 bzw. 2015 genannt werden (ebd.).

Westlich angrenzend befindet sich der größte geplante Luftraumblock EC.<sup>139</sup> Nicht nur wegen seiner geographischen Lage im Zentrum Europas, sondern vor allem aufgrund seiner hohen politischen und ökonomischen Relevanz wird die weitere Entwicklung dieses Luftraumblocks über Erfolg oder Misserfolg des Luftraumblockansatzes und damit des Single European Sky insgesamt entscheiden. Die Machbarkeitsstudie zum FAB EC, die sowohl die beteiligten Mitgliedsstaaten als auch die zivilen und militärischen Flugsicherungsdienstleister einbezieht, wurde im Juli 2008 fertig gestellt. Wiederholt wird darin betont, dass die Umsetzung des FAB EC nicht nur machbar, sondern dringend erforderlich sei, um den Herausforderungen des zukünftigen Verkehrswachstums zu begegnen (FAB Europe Central Initiative 2008b:3, 2008b:13 und 2008b:110).<sup>140</sup> Die angestrebten Sicherheits- und Verspätungsreduktionsziele sind für diese Untersuchung nicht relevant. Nennenswert sind dagegen die potenziellen Kosteneinsparungen, die 2025 zwischen 3,6 und 9,8 Milliarden Euro liegen sollen. Besonders interessant sind die Angaben zur Flugstreckeneffizienz und die daraus resultierenden Kerosinspareffekte. Die Autoren der Studie betonen, dass sich die Flugstreckeneffizienz (Begriffsklärung siehe 4.3.1.) ohne die Realisierung des FAB EC weiter verschlechtern würde (FAB Europe Central

---

<sup>138</sup> Anmerkung: Im Bericht finden sich unterschiedliche Angaben hinsichtlich des weiteren Verlaufs des Blue Med. So wird beispielsweise der Beginn der „Grundsatzentscheidungsphase“ („Decision in Principle“) einmal mit Mitte 2012 (vgl. Abb. 4.17.) und in einer weiteren Grafik (2008a:A-3) mit Anfang 2010 angegeben.

<sup>139</sup> Auf einer Fläche von 1,7 Millionen km<sup>2</sup> würde er 55 Prozent (5,3 Millionen Flüge) des europäischen Flugverkehrs erfassen (FAB Europe Central Initiative 2008a:2).

<sup>140</sup> Gegenüber 2005 wird von einem Verkehrswachstum von 50 Prozent bis 2018 ausgegangen (FAB Europe Central Initiative 2008b:5).

Initiative 2008b:103).<sup>141</sup> Die FAB EC Reduktionsziele sind bis 2010 identisch mit den angestrebten Werten für das gesamte Eurocontrolgebiet (Reduktion der unnötig geflogenen Strecke um jährlich zwei km, vgl. 4.3.1), ergänzt um eine weitere Senkung um zwei km bis 2018. Neben dieser ins Auge gefassten Gesamtreduktion des durchschnittlichen Umweges um 12 km (2006 bis 2018) hält die Studie (ebenfalls bis 2018) unter anderen durch die Einführung der „4D-Flugbahnfreigabe“ (siehe oben) gar eine Verringerung um 17,4 km im Vergleich zu heute für möglich (FAB Europe Central Initiative 2008b:6). Angesichts der sich abzeichnenden negativen Tendenz der Zielerreichung im gesamten Eurocontrolgebiet (vgl. 4.3.1), scheint es sich hierbei jedoch um einen theoretischen Maximalwert zu handeln. An späterer Stelle der Studie räumen dies die Autoren selber ein: „These figures [gemeint sind die 17,4 km] are considered to be a maximum; it is likely that the actual benefit achieved will be lower“ (FAB Europe Central Initiative 2008b:103). Diese Aussage kann als gleichermaßen gültig für einen Teil der angegebenen Treibhausgaseinsparungspotenziale angesehen werden, da sie sich proportional aus den (horizontalen) Flugstreckeneffizienzgewinnen ableiten (FAB Europe Central Initiative 2008b:6). Analog zu der Flugstreckeneffizienz wird zunächst ein „Business-as-usual-Wert“ (also das Ausbleiben des FAB ECs) als Referenz angegeben, der sich im Falle des zusätzlich verbrannten Treibstoffs bis 2018 auf durchschnittlich 260 kg pro Flug erhöhen würde. Durch die verbesserte Flugstreckeneffizienz der Initiative ließe sich dieser Wert laut Studie auf 139 kg begrenzen. Damit liegt der Zielwert nur geringfügig unter dem heutigen Wert von etwa 150 kg (vgl. horizontale Flugstreckeneffizienz in Tab. 4.5.). Angesichts des damit verbunden, weiterhin hohen Treibhausgasausstoßniveaus (ca. 438 kg Kohlendioxid und 1,3 kg Stickstoffoxid) kann daher nicht von einer wirklichen Reduktion, sondern vielmehr von einer Begrenzung des Wachstums bzw. einer Stabilisierung der aktuellen Situation gesprochen werden. Die darüber hinaus in der Zusammenfassung der Studie angegebene Reduktion des zusätzlich verbrauchten Treibstoffs in Höhe von 72 kg (zwischen heute und 2018) kann nur auf die Senkung des durchschnittlich geflogenen Umweges um 17,4 km (siehe oben) zurückgeführt werden (FAB Europe Central Initiative 2008b:103). Daher dürfte auch hier die wirkliche Realisierbarkeit stark zweifelhaft bleiben.

---

<sup>141</sup> Angenommen wird eine anteilige Erhöhung der durchschnittlichen Umwegstrecke an der Gesamtfluglänge auf 6,1 Prozent bis 2018 (ebd.). Zur Situation heute siehe 4.3.1.

Insgesamt hängt die Erreichung der einzelnen Ziele in hohem Maße von den gewählten Instrumenten und Konzepten ab. Als „key elements“ führt die Studie das gemeinsame Operationskonzept („Common operational concept“) sowie das neue Luftraumdesign („airspace design“) an (alle FAB Europe Central Initiative 2008b:7). Ersteres sieht unter anderem die funktionale Zusammenlegung des Flugverkehrsmanagements („air traffic flow management“) mit dem Luftraummanagement („airspace management“) vor, wovon man sich eine verbesserte Abstimmung von Nachfrage und Kapazität verspricht (FAB Europe Central Initiative 2008b:7). Die Neustrukturierung des Luftraumdesigns folgt der Grundidee des Single European Sky, das Flugroutennetz nicht wie bisher an nationalen Grenzen, sondern an Verkehrsströmen auszurichten. Es wird betont, dass beide „Schlüsselemente“ unter aktiver Beteiligung der militärischen Luftraumnutzer entworfen worden sind (FAB Europe Central Initiative 2008b:7).<sup>142</sup>

Über ihre erfolgreiche Umsetzung wird nicht zuletzt die institutionelle Einbettung entscheiden, da diese sowohl Fragen der Zuständigkeit als auch der rechtlichen Haftung klärt. Die FAB EC Studie mahnt den Umbau der bestehenden, institutionellen Struktur an (FAB Europe Central Initiative 2008b:9) und macht Vorschläge, wie dieser gestaltet werden kann. Zunächst sollten die beteiligten sechs Flugsicherungsdienstleister im Rahmen einer „vertraglichen Kooperation“ („contractual cooperation“) bis 2010 ihre Kooperation intensivieren und sich auf einen gemeinsamen Entscheidungsfindungsprozess einigen. Ihre finanzielle und rechtliche Unabhängigkeit sollen die Flugsicherungsdienstleister erst in der darauf folgenden „Allianz-Phase“ („Alliance“) partiell abgeben, in der die Bildung von Jointventures vorgesehen ist. Nach Abschluss dieser Phase sollen die Jointventures ab 2013 die Grundlagen für eine „zentralisierte Einheit“ („Centralised Unit“) schaffen. Die letzte Phase („single ANSP“, „alleiniger Flugsicherungsdienstleister“), in der die Flugsicherungsdienstleister ihre finanziellen und rechtlichen Souveränitäten vollständig an eine Supra-nationale Organisation abgeben, wird als „optional final step“ (FAB Europe Central Initiative 2008b:78) bezeichnet.

---

<sup>142</sup> Die weiteren gemeinsamen Ansätze auf den Gebieten des Sicherheitsmanagements, der Gebührenerhebung sowie der Ausbildung werden nicht weiter diskutiert, da sie für diese Ausarbeitung von sekundärer Relevanz sind.

Angesichts des geplanten Ablaufs der beschriebenen Phasen sowie der allgemeinen „Roadmap“ der Studie, wird der in Abbildung 4.17. aufgezeigte Zeitplan nicht einzuhalten sein.<sup>143</sup>

Damit bleibt, wie zuvor gezeigt, nicht nur der Großteil der übrigen FABs, sondern auch das Kernstück des Luftraumblockansatzes hinter den gestellten Erwartungen zurück. Dies hat auch die Europäische Kommission erkannt, die hierzu bemerkt: „Die Integration in funktionalen Luftraumblocken ungeachtet der Staatsgrenzen ist auf vielerlei Hindernisse gestoßen“ (Europäische Kommission 2008:3). Weiter kommt die Kommission zu dem Schluss, dass es „bei der Gesamteffizienz der Auslegung und Nutzung des europäischen Luftstraßennetzes kaum Fortschritte gegeben“ (ebd.) hat und „die Mitgliedstaaten keine Schritte zur Verbesserung der Kosteneffizienz“ (ebd.) unternommen haben.<sup>144</sup>

Aus dieser Erkenntnis heraus wurde Mitte 2008 ein zweites Maßnahmenpaket zum Single European Sky (genannt SES II) verabschiedet (European Commission 2008), das den bestehenden SES erweitern und dessen zentrale Punkte stärken soll (vgl. Europäische Kommission 2008). Der SES II besteht aus den vier Pfeilern: Leistungsregulierung, einheitlicher Sicherheitsrahmen, Öffnung für neue Technologien und Verwaltung der Kapazität am Boden (ebd. 2008:8ff.).

Im Rahmen des ersten Pfeilers soll ein „unabhängiges Leistungsüberprüfungsgremium“ (ebd. 2008:8) Kennzahlen sowie akteurübergreifende Ziele für das Flugverkehrsmanagementsystem erarbeiten, die nach der Genehmigung durch die Kommission an die nationalen Aufsichtsbehörden weitergegeben werden. Die vereinbarten Ziele werden als „verbindlich“ (ebd.) angesehen. Zur Förderung der bestehenden funktionalen Luftraumblockinitiativen nennt die Kommission folgende drei Möglichkeiten: Festlegung von Fristen für die Umsetzung (bis spätestens 2012), Ausdehnung des Anwendungsbereichs auf den unteren Luftraum bis zum Flughafen sowie die „Beseitigung nationaler, rechtlicher und institutioneller Hindernisse“ (Europäische Kommission 2008:9). An dem derzeitigen Bottom-Up-Ansatz wird damit „vorläufig“ (ebd. 2008:8) festgehalten. Ergänzend soll die Netzmanagementfunktion gestärkt werden, die unter anderem eine bessere Ausnutzung von sich ergebenden Zeitnischen bewirken soll.

---

<sup>143</sup> Allein die wesentlichen Teile des Luftraumbaus sollen der „Roadmap“ zufolge erst ab 2014 beginnen (FAB Europe Central Initiative 2008b:12).

<sup>144</sup> Der Fortschritt des SES wird im folgenden Abschnitt 4.3.3. detaillierter bewertet.

Die Schaffung eines einheitlichen Sicherheitsrahmens (zweiter Pfeiler) soll durch die Kompetenzerweiterung der Europäischen Agentur für Flugsicherheit (EASA) auf die Flughäfen sowie das Flugverkehrsmanagement bzw. die Flugsicherungsdienste erfolgen (Europäische Kommission 2008:9).

Der dritte Pfeiler schlägt die Ausarbeitung eines europäischen Masterplans zum Luftverkehrsmanagement, basierend auf dem bereits existierenden SESAR Masterplan (siehe dieser Abschnitt oben), vor. Zudem wird die „kollektive Verantwortlichkeit“ und „das Engagement aller Luftfahrtkreise“ (ebd. 2008:10) für die technologische Erneuerung des europäischen Luftverkehrssystems angemahnt.

Um die Verwaltung der Bodenkapazität (vierter Pfeiler) zu verbessern, soll der bereits vom Europäischen Parlament und Rat gebilligte „Aktionsplan für Flughafenkapazität, Effizienz und Sicherheit in Europa“ umgesetzt werden (ebd. 2008:11). Dessen nähere Thematisierung würde an dieser Stelle jedoch zu weit führen.

#### **4.3.3. Kritische Betrachtung des Single European Sky**

Der SES und die damit verbundene Umstrukturierung des europäischen Luftraums lässt sich mit der Aussage „hohes Potenzial – kaum Fortschritt“ zusammenfassen. Der erste Teil der Aussage ist dabei leicht nachvollziehbar. Durch die historisch gewachsene und an Nationalstaaten orientierte Struktur zeigt sich der europäische Luftraum heute als ein Flickwerk aus schlecht kooperierenden Einzelstücken (siehe Karte 4.1.). Dies führt zu erheblichen Ineffizienzen (4.3.1.) bei der Steuerung der europäischen Flugverkehrsströme, wodurch sich wiederum ein hohes Einsparungspotenzial im Hinblick auf betriebswirtschaftliche, gesellschaftliche und umweltrelevante Kosten ergibt (ebd.). Die Identifizierung sowohl des Problems als auch des sich daraus ableitenden Einsparungspotenzials ist längst erfolgt. Als Konsequenz wurde der SES gegründet. Im Gegensatz zu den übrigen marktpolitischen Änderungen, wie etwa der Treibstoffsteuereinführung oder dem Zertifikatehandel, in dessen Rahmen sich Industrie und Politik konträr gegenüberstehen (vgl. 4.4.1. und 4.4.3.), käme die Verwirklichung des SESs dem Großteil der Beteiligten zugute. Warum trifft der zweite Teil der oben angeführten Aussage dennoch zu? Der bisher enttäuschende Fortschritt des SES Projekts hat im Wesentlichen folgende drei Gründe: Erstens ist die zu bewältigende Aufgabe

immens, zweitens erweist sich die Interessenlage der zahlreichen Einzelakteure bei genauerer Betrachtung als weit weniger homogen als zunächst angenommen und drittens weist der zur Umsetzung gewählte Ansatz deutliche Schwächen auf.

Um am Ende das Ziel „einen einzigen, homogenen europäischen Luftraum“ zu realisieren, müssen nicht nur Harmonisierungen und Optimierungen in den Bereichen der technischen Systeme, der operationellen Verfahren sowie der Ausbildung und Kostenerhebung von 47 verschiedenen Flugsicherungsdienstleistern erfolgen (Tab. 4.4.). Die 38 beteiligten Staaten (siehe Anhang A) müssen zudem zentrale Fragen der Souveränität und Zuständigkeit klären. Verschärfend kommt hinzu, dass der massive Strukturwandel ohne Beeinträchtigung des laufenden Flugbetriebs und unter steigender Gesamtbelastung des Systems (durch ein wachsendes Verkehrsaufkommen, siehe oben) vollzogen werden muss. Die zu lösende Gesamtaufgabe kann daher als enorm bezeichnet werden.

Während die Luftraumnutzer (allen voran die Fluggesellschaften) ein sehr hohes Interesse an der Optimierung des europäischen Luftraums haben und generell die EU-Mitgliedstaaten dem Projekt SES ebenfalls positiv gegenüber stehen, stellt sich dies bei Teilen der dritten Akteursgruppe, den Flugsicherungsdienstleistern, anders dar. Ein verbessertes Luftraummanagement wird nicht allein durch die Zusammenlegung von Luftraumblöcken, sondern besonders durch Effizienzsteigerung am Boden zu erreichen sein. Im Rahmen der Konsolidierung von Flugsicherungsdienstleistungen wird sich sowohl die Anzahl der zivilen Anbieter als auch die Anzahl der benötigten Kontrollzentren reduzieren. Besonders kleinere Dienstleister müssten dann um ihre Existenz fürchten bzw. Personal abbauen (Oster und Strong 2007:70). Arbeiternehmervertretungen haben bereits ihre ablehnende Haltung gegenüber möglichen Zusammenlegungen von Kontrollzentren geäußert (siehe Flight International 2002). Zur Zeit befinden sich die Flugsicherungsdienstleister in der komfortablen Position, keinen Marktzwängen zu unterliegen.<sup>145</sup> Da die Zuständigkeit je nach Luftraum klar abgegrenzt ist, stehen die verschiedenen Flugsicherungsdienstleister in keiner Konkurrenz zueinander. Als natürliche Monopolisten sind sie in der Lage, die Gebührenhöhe den entstandenen Kosten entsprechend anzupassen (vgl. Europäische Kommission 2007c:3). Für die Flugsicherungsdienstleister besteht damit aus betriebswirtschaftlicher Perspektive kein direkter Anlass kostensparend zu arbeiten (siehe Van Houtte 2007:182). Dies

---

<sup>145</sup> Dies wurde im Expertengespräch mit Bittlinger (vgl. Anhang B) sehr deutlich.

wird als ein zentraler Grund für die überdurchschnittlich hohen Flugsicherungskosten im europäischen Luftraum gesehen (Europäische Kommission 2008:6, vgl. auch 4.3.1.). Des Weiteren befindet sich ein Großteil der Flugsicherungsdienstleister in öffentlicher Hand (Van Houtte 2007:182).<sup>146</sup>

Die militärische Dimension spielt in der vorliegenden Arbeit allgemein eine untergeordnete Rolle. In der Diskussion des SES ist sie jedoch „one of the most challenging aspects“ (Van Houtte 2007:190). Die Anordnung der Militärstützpunkte und der zugeordneten Lufträume ist historisch bedingt. Während des zweiten Weltkriegs wurden zahlreiche Standorte im Zentrum Europas errichtet, die heute mit der zivilen Nutzung konkurrieren (ebd. 2007:182). Das Militär dürfte von sich aus kaum Interesse an einer Aufgabe ihrer Trainings- und Operationsgebiete haben. Eine Bindung an den rechtlichen Rahmen des SES besteht nicht (vgl. SES Verordnungen in 4.3.2. sowie deren folgende Diskussion). Von der Europäischen Kommission wurde dieses Problem bereits früh erkannt. Die daraufhin eingeführte Verordnung (2150/2005) über die flexible Nutzung des Luftraums erzielte bisher jedoch nicht die gewünschte Wirkung (Europäische Union 2005).<sup>147</sup>

Angesichts der aufgezeigten großen Herausforderung sowie der komplexen Interessenlage bedarf es robuster rechtlicher Rahmenbedingungen, um eine stabile Grundlage für Veränderungen zu schaffen. Ist dies durch die vier Kernverordnungen des SES (siehe 4.3.2) gelungen? Die Frage muss aus heutiger Sicht klar verneint werden. Der schwerwiegendste Fehler wurde bei der Entscheidung für den Bottom-Up-Ansatz gemacht. Anstatt eine supra-staatliche Organisation zu gründen und diese mit den entsprechenden rechtlichen Kompetenzen auszustatten, einigten sich das Europäische Parlament und der Rat der Europäischen Union darauf, die Durchführungsverantwortung in die Hände der EU-Staaten zu legen (siehe erste Verordnung in 4.3.2.). Eurocontrol wurde damit in die Rolle des Beraters gedrängt, dem keinerlei Einfluss auf die Umsetzung der entworfenen Konzepte gewährt wird.

Die zweite Verordnung des SES (siehe 4.3.2.) bringt Eurocontrol zusätzlich in eine „difficult and sensitive position“ (Van Houtte 2007:68). Die Flugsicherungsdienstverordnung sieht berechtigter Weise die funktionale Trennung

---

<sup>146</sup> In Deutschland scheiterte die Privatisierung der Deutschen Flugsicherung 2006 an verfassungsrechtlichen Bedenken des Bundespräsidenten (Deutscher Bundestag 2006).

<sup>147</sup> Die Kommission für Leistungsüberprüfung hält in Bezug zur flexiblen Kooperation zwischen zivilen und militärischen Luftraumnutzern fest: „There is no progress in direct route extension [zusätzlich geflogene Strecke], neither during weeks or weekends [...] although there is virtually no military activity during weekends“ (PRC 2008b:61).

zwischen der Erbringung und der Überwachung von Flugsicherungsdienstleistungen vor. Im Falle von Eurocontrol ist die Anwendung dieses Prinzips nicht unproblematisch, da die Organisation sowohl Flugsicherungsdienste anbietet als auch einen „considerable influence on regulation“ (ebd.) hat. Durch die geplante Konsolidierung der Flugsicherungsdienstleister sehen die übrigen Anbieter Eurocontrol zunehmend als Konkurrenten an, der durch seine duale Rolle einen nicht unwesentlichen Wettbewerbsvorteil erhält. Die Civil Air Navigation Service Organisation (CANSO), die die Interessen der Flugsicherungsdienstleister vertritt, mahnt daher die Rolle und Funktion von Eurocontrol neu zu definieren (CANSO 2004).

Die Schwäche des Bottom-Up-Ansatzes, respektive der EU-Mitgliedsstaaten, kommt bei keiner Verordnung so deutlich zum Tragen wie bei der Luftraumverordnung (vgl. 4.3.2.). Der Ansatz, über die Bildung von zunächst kleineren FABs der Lösung eines einzigen, homogenen Luftraums näher zu kommen, kann per se nicht als falsch bewertet werden. Dennoch hat die nähere Auseinandersetzung mit dem FAB-Ansatz unter 4.3.2. gezeigt, dass die Mehrheit der initiierten Kooperation hinter den ursprünglichen Erwartungen teilweise weit zurück bleibt. Der Luftraumblock UK-Irland wird der erste und einzige sein, der 2008 den Betrieb aufnehmen könnte (Abb. 4.17.). Die übrigen Initiativen sind von ihrer Fertigstellung noch Jahre entfernt. Die Zukunft von drei Kooperationen (Spain-Portugal, Baltic sowie Danube) ist generell ungewiss. Es soll nicht der Eindruck entstehen, dass der mangelnde Fortschritt allein auf den gewählten Bottom-Up-Ansatz bzw. die vage Formulierung der Luftraumverordnung zurückzuführen ist. Die vielschichtigen politischen Hürden, insbesondere der östlichen FABs Baltic, Danube und Blue-Med wären unter einer Top-Down-Struktur ebenfalls zum Tragen gekommen.<sup>148</sup> Für den FAB Spanien-Portugal darf jedoch angenommen werden, dass unter der Aufsicht bzw. dem Druck einer überstaatlichen potenten Organisation die Entwicklung heute weiter voran geschritten wäre. Zumindest darf bezweifelt werden, dass es zu den Überlegungen gekommen wäre, eventuell doch für jedes Land einen eigenen FAB einzurichten (4.3.2.). Ein „funktionaler“ Luftraumblock, der sich weiterhin an den nationalen Staatsgrenzen orientiert und zudem auf ein Land beschränkt, widerspricht klar dem Grundgedanken des FAB-Ansatzes, über größere Luftraumeinheiten Skaleneffekte zu erzielen.

---

<sup>148</sup> Dies gilt gleichermaßen für die gescheiterte Initiative SEE FABA.



Dass der Bottom-Up-Ansatz durchaus auch erfolgreich angewendet werden kann, zeigt das Beispiel des Luftraumblocks NUAC. Zwar gehen auch hier lediglich zwei Länder eine Kooperation ein, dennoch beweisen Schweden und Dänemark, dass sich mit der entsprechenden Unterstützung der Regierungen konkrete Fortschritte erzielen lassen.

In gewissem Maße gilt dies auch für den FAB CE, dessen bisherige Entwicklung ebenfalls stark von den beteiligten Regierungen geprägt wurde. Inwieweit sich jedoch Effizienzsteigerungspotenzial ohne die Straffung der bestehenden Struktur und ohne die Einrichtung einer staatenübergreifenden Regelungs- bzw. Kontrolleinrichtung ausschöpfen lassen, bleibt fragwürdig.

Die Machbarkeitsstudie zum FAB EC gewährt interessante Einblicke in das Herzstück des Luftraumblockansatzes. Das Dokument enthält konkrete Vorschläge zur Umsetzung des größten und wichtigsten FABs. Die vorgeschlagenen Schritte, insbesondere die Zusammenlegung des Flugverkehrsmanagements mit dem Luftraummanagement sowie die Konsolidierung der Flugsicherungsdienstleistungen, erscheinen nötig und sinnvoll. Dass die Bildung eines supranationalen Flugsicherungsdienstleisters lediglich als optionaler Schritt bezeichnet wird, zeigt zum einen, wie weit der FAB EC von seinem eigentlichen Ziel entfernt ist und zum anderen, dass dies von Autoren der Studie erkannt wurde. Bei der Umsetzung der Studie in messbare Maßnahmen dürfte sich die militärische Komponente als kritisch erweisen. Zwar wird dieses Problem nicht explizit angesprochen und das Militär „actively involved“ (FAB Europe Central Initiative 2008b:7), dennoch findet sich im Zusammenhang mit dem Militär wiederholt die Formulierung „further studies are required“ (ebd. 2008b:3, 2008b:97). Die kritische Rolle des Militärs hätte im Rahmen einer separaten Risikoeinschätzung (wie sie etwa für den SESAR Masterplan (SESAR Consortium 2008b:90ff.) und in Ansätzen für den allgemeinen FAB Bericht (PRC 2008a:81ff.) durchgeführt wurden) näher analysiert werden müssen. Trotz dieses Versäumnisses bietet die Studie eine solide Grundlage für den weiteren Verlauf des Projekts. Sie zeigt, dass die Realisierung des FAB EC dringend erforderlich ist, um weitere wachstumsbedingte Effizienzverluste in Zukunft zu kompensieren.

Insgesamt betrachtet erweist sich der FAB-Ansatz als nicht unproblematisch. Während die politischen und ökonomischen Probleme prinzipiell als lösbar sowie der Bottom-Up-Ansatz als korrigierbar anzusehen sind, birgt die angestrebte Aufteilung

in acht Luftraumblöcke ein zentrales Risiko. Setzen die einzelnen FABs wie bisher geschehen weiter auf die alleinige Optimierung innerhalb ihres FABs (FAB Europe Central Initiative 2008b:83), ohne dabei den späteren Anschluss an die angrenzenden FABs zu berücksichtigen, droht eine erneute Fragmentierung des europäischen Luftraums bestehend aus größeren Stücken. Besonders dringlich sind Untersuchungen zur möglichen Verschmelzung der einzelnen FABs vor dem Hintergrund, dass sich die geplante FAB-Struktur keineswegs an den Verkehrsströmen orientiert, sondern von nationalstaatlichen Grenzen geprägt wird (siehe Karte 4.1.). Dieser Punkt ist bislang massiv vernachlässigt worden.

Auf der technischen Seite hat man das Problem der Kompatibilität bereits erkannt. Die vierte Verordnung des SES trägt der nötigen Interoperabilität und Harmonisierung der bestehenden Systeme am Boden und in der Luft Rechnung. Der SESAR Masterplan, der unter 4.3.2. näher betrachtet wurde, scheint ein geeignetes Werkzeug für die breite Einführung von Innovationen und die Anpassungen heutiger Technologien zu sein. Dass eine Überholung der derzeit eingesetzten Systeme längst überfällig ist, wurde in 4.3.1. angedeutet. Der Umschwung des Masterplans, die Fokussierung weg von der Angebotsseite (den Flugsicherungsdienstleistern) hin zu der Nachfragerseite (den Luftraumnutzern) vorzunehmen, ist zu begrüßen. Es wird sich zeigen, wie stark hier die Widerstände der Flugsicherungsdienstleister ausfallen. Die größte Schwäche des Masterplans ist jedoch die Finanzierung. Hierbei dürfte sich nicht nur die Gesamthöhe von 30 Milliarden Euro (vgl. 4.3.2.), sondern auch deren Verteilung als kritisch erweisen. Angesichts der ohnehin bestehenden und abzusehenden finanziellen Belastungen der Fluggesellschaften durch den Ölpreisanstieg bzw. den Zertifikathandel (siehe 4.4.3.) kann die Finanzierung nicht als gesichert betrachtet werden. Verschärfend kommt hinzu, dass sich der „Break-Even-Point“ (vgl. Abb. 4.16.) erst 2017 erreichen lassen wird. Eine entsprechende Diskontierung des zu erwartenden Nutzens dürfte seitens der Beteiligten (insbesondere der Fluggesellschaften) nicht zu vermeiden sein.

In dem kürzlich verabschiedeten zweiten SES Paket eine Universallösung für die aufgezeigten politischen, ökonomischen und technischen Probleme zu sehen, ist illusorisch. Der SES II verspricht dennoch eine Konkretisierung und damit Stärkung seines Vorgängers. Wie erfolgreich er tatsächlich wird, hängt von den Kennzahlen und der tatsächlich zu realisierenden Verbindlichkeit ab. Genauere Einschätzungen werden sich erst nach der noch ausstehenden Festlegung der Parameter treffen

lassen. Maßgeblich wird zudem sein, was die zuständigen Entscheidungsträger unter der „Beseitigung nationaler, rechtlicher und institutioneller Hindernisse“ (Europäische Kommission 2008:9) konkret verstehen. Die Chance, den gescheiterten „Bottom-Up-Ansatzes“ im Rahmen des SES II durch einen umfassenden „Top-Down-Ansatz“ zu ersetzen, wurde zumindest verpasst. Es darf vermutet werden, dass die nötige Mehrheit hierfür auf europäischer Ebene noch nicht vorhanden war. Ansätze für ein Umdenken sind dennoch klar zu erkennen (vgl. 4.3.2.). So hält Bittlinger, der das Thema SES für die Deutsche Lufthansa betreut, im Expertengespräch richtig fest: „Der jetzige Ansatz im Single Sky II bringt mehr Top-Down-Elemente, aber er ist immer noch weit weg von einer wirklichen Top-Down-Struktur“ (vgl. Anhang B). Die angesprochenen „Top-Down-Elemente“ sind dabei nicht nur in der vorgesehenen „Leistungsregulierung“ (siehe 4.3.2.) sondern auch bei der technischen Harmonisierung zu erkennen. Dabei birgt die vorgesehene Umwandlung des bestehenden SESAR Masterplans in einen „Europäischen Masterplan“ das Potenzial, der technischen Umstrukturierung Nachdruck zu verleihen. Wohl auch aus diesem Grund wurde die Verabschiedung des SES II von der Industrie positiv aufgenommen (siehe ACI 2008, CANSO 2008, IACA 2008 und IATA 2008j).

Nachdem nun die zentralen Punkte des Projekts Single European Sky ihrer Relevanz nach in angemessener Tiefe diskutiert wurden, stellt sich die Frage: Was muss sich, kurz gesagt, ändern, um den SES in absehbarer Zeit erfolgreich umzusetzen? Neben dem wiederholt thematisierten Richtungswechsel in der Hierarchiestruktur (in dessen Rahmen auch die Rolle Eurocontrols eindeutig geklärt werden muss), müssen sich alle beteiligten Akteure nicht nur klar zu dem Projekt bekennen, sondern zudem auch konkrete und verbindliche Zusagen machen. Die Einhaltung der Zusagen sollte über ein System aus Anreizen und Strafen gesichert werden. Dies könnte sich insbesondere im Falle der Flugsicherungsdienstleister als hilfreich erweisen. Die politischen Hürden müssen durch den Abbau von Souveränitätsansprüchen im Dialog mit den betroffenen Staaten gelöst werden. Blockierenden Staaten muss die negative Konsequenz ihrer Haltung verdeutlicht werden. Vor allem muss die Kompatibilität der einzelnen Luftraumblöcke frühzeitig gesichert werden, um eine erneute Fragmentierung mit abermals „versteinerten“ Luftraumgrenzen zu verhindern. Hierzu gehört insbesondere die enge Einbeziehung des Militärs, welches sich in der größten Luftraumblockinitiative (FAB EC) als kritisches Element erweist. Um die Umsetzung des technischen Programms (SESAR) zu unterstützen, sollte die

EU weitere finanzielle Mittel bereitstellen. In jedem Fall werden erhebliche Anstrengungen finanzieller, politischer und operationeller Art nötig sein, um „das größte Klimaschutzprojekt Europas“ zu realisieren. Inwieweit diese in der Einleitung zu 4.3. angeführte Behauptung zutrifft, hängt von der Betrachtungsweise ab. Bezieht sich „Größe“ auf die Anzahl der beteiligten Akteure (38 Staaten, 47 Flugsicherungsdienstleister, hunderte Luftraumnutzer), die geographische Tragweite (10,5 Millionen km<sup>2</sup>) sowie die zu lösenden Herausforderungen, so scheint die Aussage in hohem Maß zutreffend. Für den „Klimateil“ der Aussage ist dies nur bedingt gültig. Der SES ist in erster Linie ein Projekt zur Beseitigung von bestehenden ökonomischen Ineffizienzen. Als Nebenprodukt wird dabei über eine gesteigerte Flugstreckeneffizienz auch ein Beitrag zur Emissionssenkung des europäischen Luftverkehrs geleistet. Die in diesem Zusammenhang oftmals angeführte Kohlendioxideinsparung in Höhe von zwölf Prozent (Deutsche Lufthansa 2008b:2) leitet sich aus der durchschnittlich geflogenen Umwegstrecke ab und ist daher ein theoretischer Wert (vgl. hierzu 4.3.2). Auch die im SESAR Masterplan angestrebte Emissionsreduzierung von zehn Prozent dürfte nur bei vollständiger Realisierung des Projekts zu erreichen sein. Doch selbst eine Einsparung im höheren, einstelligen Bereich wäre angesichts des zu erwartenden Wachstums des europäischen Luftverkehrsaufkommens ein wichtiger Schritt. Die getroffene Aussage ist damit auch hinsichtlich ihrer umweltrelevanten Wirkung vertretbar. Der SES ist das derzeit ambitionierteste Infrastrukturprojekt Europas, dessen Umsetzung auch aus umweltpolitischer Sicht längst überfällig ist.

Eine Drucksituation, wie sie im Rahmen des Upper Bound Szenarios (UBS) für 2030 angenommen wird, könnte den entscheidenden Impuls geben, die beteiligten Akteure des SES zu einer Einigung auf eine Top-Down-Struktur (siehe oben) zu bewegen. Angesichts der hohen Klimawirksamkeit, die dem Luftverkehr im UBS zugeschrieben wird (siehe 2.2.), dürfte die europäische Politik eine weitere Verzögerung des SES und die damit verbundenen negativen Klimaauswirkungen zumindest nur schwer rechtfertigen können (vgl. 2.2., 3.1. sowie 4.3.1.).

Sollte dagegen der äußere Druck auf die Luftfahrt und Politik abnehmen (wie zum Ende des Lower Bound Szenarios), würde den Befürwortern (siehe oben) das umweltpolitische Argument genommen (vgl. Diskussion um „das größte Klimaschutzprojekt Europas“). Eine zeitnahe und vollständige Umsetzung des SES wäre damit unwahrscheinlicher als heute.

## 4.4. Politische Instrumente

Im Zuge der Klimadebatte der vergangenen Jahre haben sich die politischen Bemühungen, die Klimawirksamkeit des Luftverkehrs zu verringern auf nationaler und internationaler Ebene intensiviert. Der Politik steht hierzu ein breites Spektrum an Instrumenten zur Verfügung. Dieses besteht im Wesentlichen aus finanzpolitischen, administrativen und ordnungspolitischen Elementen. Abbildung 4.18. zeigt die Struktur der Luftverkehrspolitik sowie ausgewählte Unterpunkte.

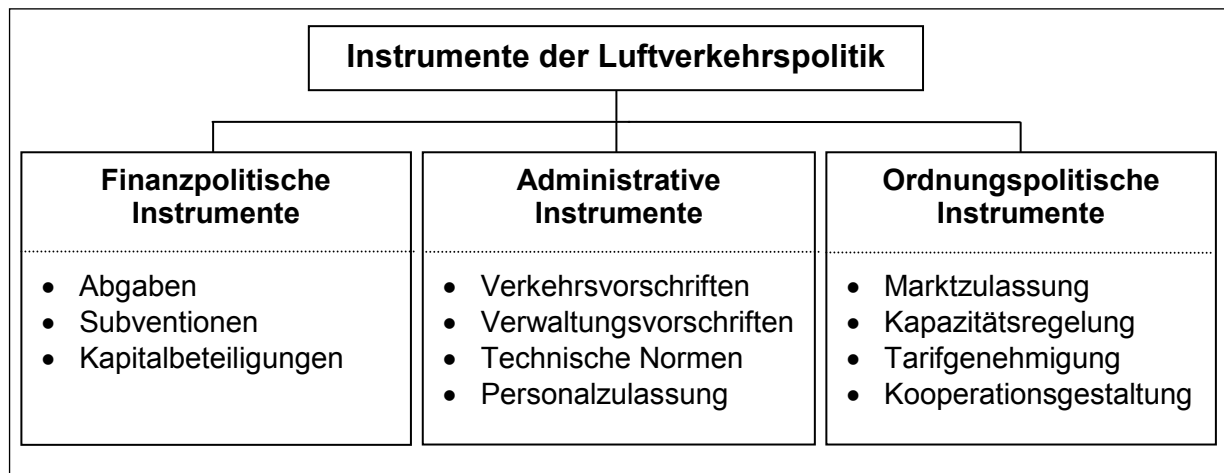


Abb. 4.18.: Instrumente der Luftverkehrspolitik. Unterpunkte sortiert nach ihrer derzeitigen Relevanz. (Quelle: Nach Mensen 2003:78)

Die folgenden Abschnitte diskutieren den aktuellen Einsatz der zentralen Instrumente sowie ihre Stärken und Schwächen. Im Rahmen der entworfenen Szenarien werden darüber hinaus Nutzungspotenziale der Instrumente aufgezeigt.

### 4.4.1. Finanzpolitische Instrumente

Im Zuge der fortgeschrittenen Privatisierung der europäischen Luftverkehrsgesellschaften hat die direkte staatliche Einflussnahme über Kapitalbeteiligungen zunehmend an Bedeutung verloren. Daher wird auf dieses finanzpolitische Instrument ebenso wenig eingegangen wie auf den Aspekt der „versteckten“ Subventionen, der im Rahmen dieser Arbeit nicht ausreichend beleuchtet werden kann.<sup>149</sup>

<sup>149</sup> Öffentliche Subventionen der Luftfahrtindustrie sind nach EG-Vertrag (Artikel 87) nicht zulässig (Europäische Union 1997:73).

Vielmehr wird das Mittel der Abgaben untersucht, welches aktuell die finanzpolitische Diskussion in Europa bestimmt. Aufeinander folgend werden nach einigen generellen Anmerkungen (in dieser Reihenfolge) die Mehrwertsteuer, die Ticketpauschale sowie die Kerosin- und Kohlenstoffsteuer thematisiert. Auf die Kerosinsteuer wird dabei näher eingegangen. Der Aspekt des Verwendungszwecks der eingenommenen Steuern übersteigt den hier vorgegeben Rahmen. Er wird daher lediglich am Rande unter 4.5. behandelt.

Allgemein spricht für die Erhebung von Steuern, dass sie die Industrie ihre eigenen Antworten finden lässt und diese meist wirtschaftlich und technisch effizienter sind als direkte Eingriffe des Staats (Barrett 2004:53). Grundlegend wird die Besteuerung der internationalen Zivilluftfahrt durch das „Abkommen von Chicago“ vom 7. Dezember 1944 geregelt (ICAO 2006a). Dieses schreibt in Artikel 15 vor, dass die Vertragsstaaten „no fees, dues or other charges“ (ebd. 2006a:8) für die Durchreise, Einreise oder Ausreise ihres Hoheitsgebiet erheben. Lediglich innerhalb eines Staates ist die Erhebung einer Abgabe bisher möglich.

Ein Beispiel hierfür ist die Mehrwertsteuer. In Deutschland werden Inlandsflüge (Start und Landung im Inland) mit dem vollen Satz dieser Steuer belegt (Umsatzsteuergesetz §8 in BMJ 2007). Alle Bestrebungen, die Mehrwertsteuer zunächst durch bilaterale Regelungen auf ganz Europa auszuweiten, sind bisher gescheitert.<sup>150</sup> Auch zukünftig dürfte eine europaweite Mehrwertsteuererhebung auf interstaatliche Flüge geringe Chancen haben, da zunächst die Steuersätze harmonisiert werden müssten (vgl. die verschiedenen Mehrwertsteuersätze in Europäisches Verbraucherzentrum 2008). Ohnehin ist der klimarelevante Nutzen einer Mehrwertsteuererhebung auf Flüge fragwürdig, da er im Allgemeinen lediglich die Kosten für die Fluggesellschaften erhöht, ohne dabei gezielte Anreize zur Kerosinreduzierung zu bieten. Zudem wären Fluggesellschaften, die besonders günstige Ticketpreise anbieten, relativ gesehen weit weniger betroffen als Anbieter des höheren Ticketpreissegments.

Anders gestaltet sich dies bei der Einführung von staatlichen Ticketpauschalen, die Flüge für wenige Euro unmöglich machen und damit die „Low Cost Carrier“ am stärksten treffen würden.<sup>151</sup> In Deutschland wurde die Ticketsteuer 2007 diskutiert

---

<sup>150</sup> Zuletzt wurde der Antrag des Bündnis 90/Die Grünen, welcher die „Abschaffung der Mehrwertsteuerbefreiung für grenzüberschreitende Flüge“ (Deutscher Bundestag 2007:2) forderte, Ende Mai 2008 vom Bundestag abgelehnt (Deutscher Bundestag 2008).

<sup>151</sup> Von dem Begriff der „Billigflieger“ wird in dieser Arbeit abgesehen.

(siehe Die Zeit 2008b). Die Niederländische Regierung erwägt eine Ticketpauschale von 11 Euro auf innereuropäische Flüge und 45 Euro auf interkontinentale Flüge zu erheben (Aviation Week 2007). In England soll die existierende Ticketpauschale („Air Passenger Duty“) ab 2009 nicht mehr pro Passagier, sondern pro Flugzeug erhoben werden (CAA 2008).<sup>152</sup> Abgesehen von einem möglichen wachstumsreduzierenden Effekt durch höhere Ticketpreise würde eine solche Pauschale jedoch ebenfalls keinen direkten Anreiz geben, den Treibstoffverbrauch zu senken.<sup>153</sup>

Die Kerosinsteuer bietet hier ein präziseres Mittel der Einflussnahme. Verschiedene Studien deuten daraufhin, dass eine Kerosinsteuer prinzipiell geeignet ist, die Klimawirksamkeit des Luftverkehrs zu reduzieren.<sup>154</sup> Die European Federation for Transport and Environment geht davon aus, dass eine EU-weit eingeführte Kerosinsteuer bereits in Höhe von 0,125 Euro pro Liter eine Kohlendioxidreduktion von zehn Prozent bewirken würde (2006:18). Eine im Auftrag des Umweltbundesamtes verfasste Studie schätzt die eingesparte Kohlendioxidmenge bei einem Steuersatz von 0,30 Euro pro Liter Kerosin im Jahr 2020 auf 14 Millionen Tonnen bzw. auf 18 Millionen Tonnen im Jahr 2030 (Matthes et al. 2008:16). Dies wird durch ein „verändertes Nachfrageverhalten“ (ebd.) erreicht.

Darüber hinaus wird die Kerosinsteuer als geeignetes Instrument angesehen die externen Kosten (Klimawirkung), die bisher nicht getragen werden, zu internalisieren (Koch 2000:49 und European Commission 2005:7).

Wie gegen jede Form der Steuererhebung wehrt sich die Industrie auch hier „vehement“ (BARIG 2002). Die Deutsche Lufthansa dürfte mit der Bezeichnung der Kerosinsteuer als „Unsinn auf ganzer Linie“ (2005:1) die Meinung der gesamten Luftfahrtindustrie treffen. Die angeführten Argumente sind dabei seit Jahren unverändert. Im Wesentlichen wird argumentiert, dass die Luftfahrtindustrie durch weitere Steuern zum einen in ihrer Gesamtheit unverhältnismäßig belastet würde und zum anderen, dass insbesondere die Kerosinsteuer brancheninterne Wettbewerbsverzerrungen verursacht (vgl. ACI 2006, ADV 2007 und IATA 2007b).

Da der Luftverkehr „als einziges Verkehrsmittel für seine Infrastrukturkosten“ selber aufkommt, würde eine Kerosinsteuer zu einer „Doppelbelastung“ (beide Deutsche

---

<sup>152</sup> Hiervon verspricht sich die Regierung jährliche Einnahmen in Höhe von 520 Millionen Pfund (HM Revenue & Customs 2007).

<sup>153</sup> Zur Preiselastizität siehe unter anderen Gillen et al. 2002, Button 2005 und Tol 2007.

<sup>154</sup> Siehe zum Beispiel Resource Analysis 1999, Vlek und Vogels 2000, Brosthaus et al. 2000, Wit et al. 2002, Krüger 2003, Barrett 2004, Button 2005, European Commission 2005, Pache 2005, MBS Ottawa 2006, Matthes et al. 2008, Schallaböck 2008.

Lufthansa 2008:8d) führen. Umweltorganisationen kritisieren dagegen die Steuerbefreiung des Luftverkehrs unter anderem als „ungerechtfertigten Wettbewerbsvorteil gegenüber der Bahn“ (BUND 2007:1).<sup>155</sup> Eine im Auftrag des Umweltbundesamts durchgeführte Studie hält 2005 hierzu fest, dass „die Einführung einer Kerosinbesteuerung keine Benachteiligung des Luftverkehrs, sondern vielmehr die Herstellung einer wenigstens teilweisen steuerlichen Gleichbehandlung des Luftverkehrs mit anderen Verkehrsträgern bedeuten würde“ (Pache 2005:7, siehe auch unten).

Es gilt jedoch nicht nur, nach dem so genannten „level playing field“ (gleiche Wettbewerbsbedingungen) im Vergleich zu anderen Verkehrsmodi zu suchen, sondern vor allem darum, die konkreten Auswirkungen auf die betroffene Industrie abzuschätzen. Dies gestaltet sich, wie verschiedene Studien auf regionaler und globaler Ebene gezeigt haben, sehr schwierig (vgl. OECD 1997, Vlek und Vogels 2000, Brosthaus et al. 2000, Krüger 2003, Button 2005, Schallaböck 2008). Durch die komplexe Fülle von Faktoren, die angefangen bei dem ökonomischen Zustand der Industrie über das allgemeine Wirtschaftswachstum bis hin zu der Entwicklung der Reallöhne reicht, sind Prognosen mit großen Unsicherheiten behaftet (Krüger 2003 und Brosthaus et al. 2001:20).

In Kapitel zwei wurde gezeigt, dass die Luftfahrtindustrie über die vergangenen Jahre stabil hohe Wachstumsraten aufwies. In 2008 zeigten sich jedoch zunächst erste negative Auswirkungen durch die starke Ölpreiserhöhung und später durch das schwächere Wachstum der Weltwirtschaft.<sup>156</sup> Seit 2006 stellen die Kerosinkosten mit weltregionalen Unterschieden, den größten bzw. zweitgrößten Kostenblock der Fluggesellschaften (siehe Tab. 4.7.). Die Industrie hat damit allein aus betriebswirtschaftlicher Perspektive ein hohes Eigeninteresse, den Kerosinverbrauch weitgehend zu senken.<sup>157</sup> Eine Kerosinsteuer würde den ölpreisbedingten Kostendruck auf alle Fluggesellschaften zusätzlich verschärfen.

---

<sup>155</sup> Diese Ansicht teilen auch Friends of Earth (FOE 2007) und Greenpeace (Smid im Expertengespräch).

<sup>156</sup> Zu den negativen Auswirkungen des gestiegenen Ölpreises siehe Aero 2008b, Schubert 2008, Thaidien News 2008, The Guardian 2008a, 2008b, 2008c und The Independent 2008. Zu den Folgen der wirtschaftlichen Abschwächung siehe 2.1.1., 2.1.2. und 2.3.

<sup>157</sup> Dies wurde insbesondere auch durch die Expertengespräche mit Bittlinger und Waibel sowie Reske und Frota deutlich.



	Nordamerika		Europa		Asien (Pazifik)		Fluggesellschaften gesamt	
	2001	2006	2001	2006	2001	2006	2001	2006
<b>Personalkosten* (in %)</b>	36,2	25,2	27,2	25,8	17,2	17,2	28,3	23,3
<b>Treibstoffkosten (in %)</b>	13,4	26,6	12,2	20,5	15,7	30,4	13,6	25,5
<b>Mietung von Fluggerät (in %)</b>	5,5	3,7	2,9	3,1	6,3	2,4	5,0	3,5
<b>Abschreibungen (in %)</b>	6,0	4,9	7,1	6,7	7,4	7,3	6,7	6,0
<b>Sonstige Kosten (in %)</b>	38,9	39,6	50,6	43,9	53,4	42,7	46,4	41,7

\*inkl. Renten

Tab. 4.7.: Zusammensetzung der betrieblichen Kosten der größten Fluggesellschaften nach Weltregion. Ausgewertet wurden die Finanzberichte der 45 größten (Passagier-)Fluggesellschaften. (Quelle: Nach IATA 2007c)

Aufgrund ihrer Kostenstruktur sind Low-Cost-Carrier in Europa von Ölpreisanstiegen am stärksten betroffen (Hahn 2006, Fischer 2008 und The Guardian 2008c).<sup>158</sup>

Aber auch die größte Fluggesellschaft der Branche, die Airfrance-KLM-Gruppe, verzeichnete im ersten Quartal 2008 die ersten Verluste seit 2003 (The Independent 2008). Der Anteil der Treibstoffkosten am gesamten Betriebsaufwand erhöhte sich bei der Deutschen Lufthansa zwischen Januar und März 2008 auf 18 Prozent (Erhöhung um 3 Prozent gegenüber dem gleichen Zeitraum in 2007) (Deutsche Lufthansa 2008c:6).

Das Argument der Unternehmen, eine Kerosinsteuer würde zu einer unzumutbaren Belastung führen, wird durch den allgemeinen Anstieg des Ölpreises gestärkt (siehe hierzu FAZ 2008a). In diesem Zusammenhang muss jedoch betont werden, dass sich zahlreiche Fluggesellschaften (unter anderen Deutsche Lufthansa, Air France, British Airways) gegen extreme Ölpreissteigerungen weitgehend abgesichert haben.<sup>159</sup> Die amerikanische Fluggesellschaft Southwest beispielsweise bezieht in diesem und im nächsten Jahr das Barrel Öl zum festgesetzten Preis von 51 USD (Fischer 2008). Die europäischen Fluggesellschaften können den allgemeinen Anstieg des Ölpreises teilweise durch den starken Euro kompensieren.<sup>160</sup> Dennoch

<sup>158</sup> In Asien dagegen wird durch den Ölpreisanstieg eine relative Stärkung der Low-Cost-Carriers für möglich gehalten (Thaindian News 2008).

<sup>159</sup> Zudem erhebt der Großteil der Fluggesellschaften bereits einen parallel ansteigenden Kerosinzuschlag auf Flugtickets (Die Welt 2008a).

<sup>160</sup> Die Deutsche Lufthansa konnte neben der Preisabsicherung (131 Million Euro), währungsbedingt weitere 97 Millionen Euro sparen und so die preisanstiegbedingten Kerosinkosten (328 Millionen Euro) reduzieren (Deutsche Lufthansa 2008e:9).

werden sich nach eigenen Angaben der Deutschen Lufthansa die Treibstoffkosten 2008 gegenüber 2003 vervierfachen (2008d:2).

Bei der Wahl der richtigen Kerosinsteuerhöhe muss damit die Balance zwischen Belastung der Wirtschaft und Wirkungsgrad der Steuer gefunden werden. Da bisher erst in wenigen Ländern Europas eine nationale Kerosinsteuer realisiert wurde, gibt es hinsichtlich der Kerosinsteuerhöhe jedoch kaum Erfahrungswerte. Unter anderen die Niederlande, Schweiz und Norwegen erheben seit einigen Jahren eine Treibstoffsteuer auf inländische Flüge (Aviationwatch 2007:3).<sup>161</sup>

Der BUND fordert für Deutschland eine Kerosinsteuer in Höhe von 0,66 Euro pro Liter Kerosin. Laut BUND Berechnung würde der Staat damit jährlich mindestens 350 Millionen Euro einnehmen (BUND 2007). Eine „deutliche Lenkungswirkung“ sieht der Verkehrsexperte Schallaböck des Wuppertal Instituts für Klima, Umwelt, Energie, bei einer Kerosinsteuerhöhe von einem Euro pro Liter Kerosin, die „einen innereuropäischen Flug um etwa 30 Euro“ (beide Schallaböck in TAZ 2008a) verteuern würde.

Je nach Einführungszeitpunkt wäre in Deutschland ein Steuersatz wahrscheinlich, der sich an den 0,30 Euro pro Liter Kerosin für 2004 der EU-Energiesteuerrichtlinie orientiert (Europäische Union 2003:13).<sup>162</sup>

Neben der richtigen Steuerhöhe ist die geographische Ausdehnung des zu steuernden Gebiets eine weitere Kernherausforderung. Hierbei besteht besonders die Gefahr, den Wettbewerb innerhalb der Luftfahrtbranche zu stören. Die Stärke der möglichen Wettbewerbsstörungen hängt dabei im Wesentlichen von dem gewählten Prinzip der Steuererhebung ab. Aus diesem Grund soll hierauf kurz eingegangen werden.

Kommt es lediglich zu einer Besteuerung des im Inland bezogenen Kerosins, so weist die Industrie zu recht auf wahrscheinliche Verzerrungen des Wettbewerbs hin (Deutsche Lufthansa 2005:1). Ein Ausweichen bei der Betankung auf kerosinsteuerfreie Länder wäre die logische Folge. Das als „Tankering“ bekannte Phänomen könnte laut dem Board of Airline Representatives in Germany (BARIG) gar umweltbelastende Folgen haben, da Fluggesellschaften mehr tanken würden als nötig, um die Betankung in den Steuerzonen zu umgehen (BARIG 2002). Diese Bedenken der Industrie teilt auch das Umweltbundesamt, welches daraufhin

---

<sup>161</sup> Außerhalb Europas erheben unter anderen bereits die USA, Indien und Japan Kerosinsteuern (siehe MOF 2006, ATA 2008 und Reuters India 2008).

<sup>162</sup> Diese Steuerhöhe hält auch das Umweltbundesamt für angemessen (Matthes et al. 2008:16).

Alternativen entwickelt hat (Pache 2005).

Die erste Variante erhebt eine Steuerpauschale auf Inlandsflüge. Hierbei orientiert sich die Höhe der Steuer lediglich an der Streckenlänge. Das Tankering Problem würde damit umgangen. Jedoch würde für die Fluggesellschaften kein zusätzlicher Anreiz geschaffen, Kerosin zu sparen, da die Steuer nach einem Durchschnittswert pauschal erhoben würde.

Die zweite Variante funktioniert wie die erste mit dem Unterschied, dass die Fluggesellschaften den tatsächlichen Verbrauch an eine zentrale Finanzverwaltung übermitteln. Damit würde sowohl der Nachteil der ersten Variante (kein zusätzlicher Kerosinsparanreiz) behoben als auch der Vorteil (Umgehung des Tankering) gewahrt. Aus rechtlicher Sicht ist dieser Ansatz konform mit dem Abkommen von Chicago, den weiteren bilateralen Abkommen mit anderen EU-Staaten sowie dem deutschen Recht. Lediglich eine Anpassung des Verbrauchsteuerrechts wäre nötig, da dieses bisher „eine an den Verbrauch anknüpfende Besteuerung von im Inland bezogenen Treibstoffen“ (Pache 2005:100) nicht zulässt. Alternativ könnte die zweite Variante mit einer Besteuerung des im Inland getankten Treibstoffs kombiniert werden. So würden im besteuerten Gebiet sowohl inländische und ausländische Mineralöle als auch inländische und ausländische Flugzeuge gleichermaßen besteuert, ohne gegen geltende Gesetze zu verstoßen.

Die Ausweitung eines solchen Modells wäre nach Abschluss von bilateralen Abkommen zwischen zwei Staaten „grundsätzlich zulässig“ (Pache 2005:113). Einen entscheidenden Nachteil hätten jedoch auch die bilateralen Abkommen. Flüge, die nicht von einer der beiden Vertragsstaaten zugehörigen Fluggesellschaft zwischen den Vertragsstaaten durchgeführt würden, wären rechtlich nicht Gegenstand der Besteuerung. Damit würden die Fluggesellschaften der Vertragsstaaten klar benachteiligt.

Die interstaatlichen Wettbewerbsverzerrungen nehmen damit mit zunehmender Zahl an Staaten ab, die sich auf multilaterale Abkommen mit harmonisierten Kerosinsteuersätzen einlassen. Idealerweise würden sich so alle Staaten europaweit bzw. weltweit zeitgleich auf eine einheitliche Kerosinbesteuerung einigen. Ein so umfassendes Übereinkommen ist jedoch auf absehbare Zeit weitgehend illusorisch. Denkbar wäre dagegen ein einheitliches Abkommen zwischen den europäischen Ländern, die bereits eine Kerosinsteuer erheben, ergänzt um die Länder, die einer Kerosinsteuereinführung offen gegenüberstehen (unter anderen Deutschland und

Frankreich). Ein solcher Zusammenschluss könnte als Vorbild dienen und den politischen Druck auf weitere Staaten (später auch außerhalb Europas) erhöhen, sich dem Abkommen anzuschließen (Brosthaus et al. 2000:21 und Die Zeit 2007).

In Deutschland forderte die damalige Umweltministerin Angela Merkel bereits 1995 die Einführung der Kerosinsteuer (Der Spiegel 1995:175). Zehn Jahre später wurde auf Anregung von Deutschland und Frankreich die Kerosinsteuer auf einem Treffen der sieben führenden Industrienationen diskutiert (Schieritz 2005). Zu konkreten transatlantischen bzw. innereuropäischen Maßnahmen kam es jedoch nicht.

Dies könnte sich womöglich in nächster Zeit ändern. Im Rahmen des Weltverkehrsforums in Leipzig sprach sich Verkehrsminister Wolfgang Tiefensee für die Kerosinsteuer aus und betonte, dass diese kommen werde (Leipziger Volkszeitung 2008). „Es gibt keinen Grund, den Luftverkehr weiter steuerlich zu begünstigen“ (ebd.), hieß es weiter. In dem aktuellen Entwurf des Masterplans Güterverkehr und Logistik des Bundesministeriums für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung wird die Kerosinbesteuerung als ein Mittel mit aufgeführt (BMVBS 2008:28).

Auf europäischer Ebene betont das Parlament gegenüber der Europäischen Kommission, dass eine Kerosinsteuer und eine Stickstoffemissionsabgabe als „parallel measures“ (neben einem Zertifikathandelssystem) „necessary“ (beide European Parliament 2008b) sind.

Neben der Kerosinsteuer wäre auch eine auf Kohlenstoff fokussierte Steuer denkbar. Diese ist durch die Fortschritte bei der Einbeziehung des Luftverkehrs in den Emissionshandel (siehe 4.4.3.) jedoch europaweit in den Hintergrund gerückt. Eine solche Steuer wirkt zwar direkt auf den Kohlenstoffausstoß, dennoch ist sie nicht unproblematisch. Dies liegt vor allem daran, dass kohlenstoffferne Treibhausgase (Schwefeldioxid, etc.) hierbei nicht berücksichtigt werden (vgl. 2.1.3.). Die Industrie könnte so dazu veranlasst werden, die Triebwerke nur auf eine Kohlenstoffreduktion zu optimieren und dabei die Zunahme der übrigen Treibhausgase in Kauf zu nehmen. Der Versuch die kohlenstofffernen Treibhausgase beispielsweise über Kohlenstoffäquivalente oder das Treibhauspotenzial mit einzubeziehen, gestalten sich hier schwierig, da die Treibhauswirkung einzelner Emissionen je nach Flughöhe unterschiedlich ausfällt (siehe 2.2.1.). Sollte es gelingen, sich international auf Standards zu einigen, die diesem Umstand Rechnung tragen, ohne dabei einen übermäßigen Verwaltungsaufwand zu erzeugen, wäre eine solche

Treibhausgassteuer als sinnvoll zu erachten. In ihrer jetzigen Form ist die Kohlenstoffsteuer, wie sie etwa Norwegen erhebt, in ihrer Wirkung sehr begrenzt (Ministry of Finance Norway 2008).<sup>163</sup>

Die Diskussion der verschiedenen Steuervarianten hat gezeigt, dass die Kerosinsteuer als das derzeit effizienteste finanzpolitische Instrument, nicht unproblematisch ist. Besonders die Steuerhöhe sowie das zu erfassende Steuergebiet erweisen sich als kritisch. Geringe Wettbewerbsverzerrungen werden sich auch bei einem Zusammenschluss mehrerer Staaten, zumindest in der Anfangsphase, nicht vollständig vermeiden lassen. Dies sollte jedoch nicht dazu führen, die Kerosinsteuer kategorisch auszuschließen.

Die Besteuerung von Kerosin ist nicht als „Stand-Alone-Maßnahme“ zu verstehen. Sie sollte vielmehr flankierend in einem Maßnahmenpaket eingesetzt werden. Das Zusammenspiel mit den weiteren Paketkomponenten entscheidet letztlich über die zu wählende Intensität der Kerosinsteuer, die zu einer substantiellen Emissionsreduktion führt, ohne dabei die Industrie in ihrer Gesamtheit zu überfordern.

Diese Balance könnte je nach Szenario zur einen bzw. anderen Seite kippen.

Auch wenn die Zurücknahme einer bereits eingeführten Kerosinsteuer unter LBS Bedingungen unwahrscheinlich wäre, so könnte die Steuerhöhe doch bis zur klimarelevanten Wirkungslosigkeit gesenkt werden. Bei einer Absenkung auf unter 0,10 Euro pro Liter Kerosin könnte dann in Relation zur aktuellen Höhe des Rohölpreises von einer „Quasi-Abschaffung“ der Steuer gesprochen werden. Ob es in einer LBS Situation wirklich dazu kommt, hängt nicht zuletzt von der Bereitschaft der Staaten ab, auf die Einnahmequelle der Kerosinsteuer zu verzichten (vgl. analoge Argumentation des LBS in 4.4.3.).

Im Falle des UBS erscheint die Einführung einer Kerosinsteuer in nicht unwesentlicher Höhe (ein Euro pro Liter Kerosin und darüber) als sehr wahrscheinlich. Unter dem hohen Druck wäre ein gesamteuropäischer Ansatz zudem wahrscheinlicher als heute. Da das UBS annimmt, dass sich besonders die künstliche Wolkenbildung als kritisch erweist, wäre weiterhin eine Steuervariante denkbar, die auf die Reduktion der Wasserstoffemissionen abzielt (siehe 2.2.2.).

---

<sup>163</sup> Eine 2007 veröffentlichte Studie zeigte, dass eine weltweit eingeführte Steuer von 1 000 USD pro Tonne Kohlendioxid den Kohlenstoffausstoß der internationalen Luftfahrt lediglich um 0,8 Prozent verringern würde (Tol 2007).

Die Einführung einer EU-weiten Mehrwertsteuer auf Flugbewegungen wäre durch das UBS besonders im Vergleich zu den übrigen Verkehrsmodi (Straßen- und Schienenverkehr) generell begünstigt. Ob und in welcher Höhe es zu einer tatsächlichen Erhebung kommen würde, hinge in erheblichem Maße von dem Harmonisierungsgrad der Mehrwertsteuersätze in Europa zu diesem Zeitpunkt ab.

#### **4.4.2. Administrative Instrumente**

Im Vergleich zu den übrigen politischen Instrumenten kommt der administrativen Seite nur eine geringe Bedeutung zu, die sich bisher wirtschaftlich kaum auswirkt (Mensen 2003:79). Dem Autor dieser Arbeit ist national oder international zudem kein administratives Instrument bekannt, welches direkt und ausschließlich auf die klimatischen Auswirkungen des Luftverkehrs abzielt. Von den vier Komponenten technische Normen (diverse Vorschriften für Geräte und Anlagen), Personalzulassung, Verwaltungsvorschriften (unter anderem die Luftfahrtstatistik) und Verkehrsvorschriften weist lediglich letztere ein größeres Potenzial zur klimarelevanten Einflussnahme auf den Luftverkehr auf. Da dieses von der Politik bisher weitgehend ungenutzt bleibt, wird auf die Darstellung der derzeitigen Anwendung verzichtet und sich direkt den möglichen UBS bedingten Anpassungen zugewendet.<sup>164</sup>

Im Falle des UBS wären verschärfte Vorgaben für die operative Abwicklung des Flugverkehrs nicht auszuschließen. Es ist bekannt, dass langsames Fliegen zu einem reduzierten Kerosinverbrauch beiträgt (IPCC 1999:281). Dies könnte zu der Einführung reduzierter Maximalfluggeschwindigkeiten je nach Flughöhe („Flight Level“) führen. Die durch diese Maßnahme zu erreichende Kerosineinsparung würde maßgeblich von dem übrigen kerosinbedingten Kostendruck abhängen. Bereits in den Siebzigern nutzten Fluggesellschaften auch ohne externe Vorgaben dieses Mittel, um Kerosinkosten zu sparen (Der Spiegel 1973:130). Derzeit nehmen unter anderen die amerikanischen Fluggesellschaften Northwest Airlines, Southwest Airlines sowie JetBlue etwas längere Flugzeiten in Kauf, um Treibstoff zu sparen

---

<sup>164</sup> Auf mögliche Auswirkungen des LBS wird nicht eingegangen, da der Aspekt des Klimawandels, wie erwähnt bei der Formulierung der administrativen Grundlage bisher keine Rolle spielt. Es könnte lediglich vermutet werden, dass der am Ende des LBS entworfene Druckabfall eine Lockerung der (in welcher Form auch immer existierenden) administrativen Vorgaben tendenziell begünstigen würde.

(The New York Times 2008).<sup>165</sup> In Europa verbraucht Tuifly durch langsames Fliegen jährlich 3 000 Tonnen Kerosin weniger (Die Welt 2008b). Brussels Airlines gibt eine Kostensenkung von einer Million Euro pro Jahr durch diese Maßnahme an (Der Spiegel 2008b).

Sollte sich, wie im UBS beschrieben, die künstliche Zirruswolkenbildung als wichtiger Strahlungsantriebsfaktor erweisen, wäre eine Einflussnahme auf die Flughöhen deutlich effektiver. Aus Abschnitt 3.3.3. ist bekannt, dass die atmosphärischen Voraussetzungen und damit die Flughöhe für die Entstehung von Kondensstreifen bzw. Zirren ausschlaggebend sind. Eine Studie des DLRs hat gezeigt, dass eine Verschiebung der üblichen Reiseflughöhe (8 bis 12 km) die Kondensstreifenbildung deutlich mindern könnte (Fichtner et al. 2005:571).<sup>166</sup> Am wirkungsvollsten sei eine Absenkung der Flughöhe um 1,8 km, die die globale Kondensstreifenbedeckung um 45 Prozent reduzieren würde (ebd.). Hierbei muss jedoch auch die veränderte Wirkung der übrigen Treibhausgase (insbesondere Methan und Stickoxid) berücksichtigt werden (vgl. 2.2.1.).<sup>167</sup>

Über die vertikalen Einschränkungen des Flugverkehrs hinaus, sind zudem Eingriffe in die geographische und zeitliche Komponente des Streckenverlaufs denkbar. Die entsprechende Vorhersagegenauigkeit vorausgesetzt, könnten so Regionen, die eine Kondensstreifenbildung fördern (vgl. 2.2.2.), temporär für den Flugverkehr gesperrt werden. Ebenso könnte ein Verbot für bestimmte Nachtflüge und Flüge am Tag über Erdoberflächen mit hoher Albedo eingeführt werden (siehe Mannstein und Schumann 2008:12ff., sowie 2.2.2.)

Weiter könnte der Druck des UBS unter Umständen gar zu einem radikalen Umschwung bei der Wahl der Verkehrsmodi führen. So könnten im extremsten Fall Flugstrecken unter 500 km, 1 000 km oder einem noch höheren Grenzwert verboten und durch eine deutliche Förderung des Schienenverkehrs ersetzt werden. Dieser massive Eingriff in den Markt würde vor allem den Low Cost Carriern weitgehend die Existenzgrundlage entziehen, da ihr Geschäftsmodell fast ausschließlich auf die Kurz- bis Mittelstrecke ausgerichtet ist (DLR und ADV 2008). Die durchschnittliche Streckenlänge der Low Cost Carrier beträgt 634 km, wobei auf 70 Prozent der Flüge

---

<sup>165</sup> Zum Beispiel verlängert sich bei Northwest Airlines durch die Reduzierung der Durchschnittsgeschwindigkeit von 872 km/h auf 856 km/h die Flugdauer von Paris nach Minneapolis um acht Minuten (Gesamtlänge acht Stunden und 58 Minuten) (ebd.).

<sup>166</sup> Die „Limitierung der Flughöhe, um die schädlichen Auswirkungen der Emissionen zu begrenzen“ (Europäisches Parlament 1998:14) wurde 1998 als anzuwendende Maßnahme vom Europäischen Parlament gefordert.

<sup>167</sup> Zur flughöhenabhängigen Kondensstreifenbildung siehe auch Rädcl und Shine 2008.

weniger als 1 000 km zurückgelegt werden (Dobruszkes 2006:253).<sup>168</sup>

Wenn auch nicht in dieser drastischen Form ist das Bestreben, den Modal Split zugunsten des Schienenverkehrs zu verlagern, nicht neu. Ende der Neuziger forderte eine umfassende Studie den Umschwung zur Schiene (Ungefug 1998). Heute stellt das Wuppertal Institut für Klima, Umwelt, Energie im Hinblick auf das Verhältnis des Flugverkehrs zum Bahnverkehr eine Veränderung des Modal Splits „zu Ungunsten der umweltfreundlicheren Verkehrsträger“ (2007) fest (siehe auch Schallaböck 2008). Neben dem bestehenden Personentransport der Bahn, soll im Rahmen des Projekts CAREX ("Cargo Rail Express") eine erhöhte Verlagerung der europäischen Luftfracht auf die Schiene forciert werden (Wüst 2008).

Hierbei ist zu beachten, dass eine Verlagerung bzw. Reduzierung wie oben skizziert, Kapazitäten für Mittel- bis Langstreckenflüge freisetzen würde. Die Maßnahme könnte damit ihre umweltpolitischen Ziele verfehlen (Fleischer 1998:97).

Zusammenfassend lässt sich damit festhalten, dass die administrative Regelung und hier insbesondere die Verkehrsvorschriften ein hohes Potenzial an klimapolitischer Einflussnahme bietet, welches bisher ungenutzt bleibt. Die möglichen Maßnahmen reichen von kleineren Anpassungen der Verkehrsvorschriften wie der Geschwindigkeitsregelung bis hin zu drastischen Eingriffen in den Markt durch (horizontale, vertikale und zeitliche) Flugstrecken- und Distanzbeschränkungen. Mit zunehmender Tragweite der gewählten Maßnahme und der Anzahl der beteiligten Akteure (unter anderen nationale und internationale Gesetzgeber), steigt jedoch der zu erwartende Widerstand. Dennoch lägen auch solche rigorosen und umfassenden Maßnahmen, angesichts des extremen Drucks des UBS, im Bereich des Vorstellbaren.

#### **4.4.3. Ordnungspolitische Instrumente**

Im Wesentlichen zielen die ordnungspolitischen Instrumente auf die Regelung des Marktes ab. Durch direkte und indirekte Eingriffe des Staats kann die Souveränität der Wirtschaftssubjekte sowohl auf der Angebots- als auch auf der Nachfrageseite beeinflusst werden (vgl. Mensen 2003:80). Angefangen von der Zulassung von Verkehrsgesellschaften über die Vergabe von Streckenrechten bis hin zur direkten

---

<sup>168</sup> Bei Easyjet betrug die durchschnittliche Flugstrecke (2006) 954 km, bei Ryanair (2005) 909 km (Ryanair 2005 und Easyjet 2007).



Einflussnahme auf die Preisgestaltung der Fluggesellschaften, bietet die Ordnungspolitik je nach nationaler bzw. internationaler Ausprägung ein vielschichtiges Instrumentarium. Die angeführten Ansätze werden hier lediglich im Rahmen der Szenarien diskutiert, um sich im Kern auf den Emissionshandel als das aktuell wichtigste politische Instrument zu konzentrieren.

Zur Zeit unterliegt der Luftverkehr, unabhängig von der Maßstabsebene, keinerlei Emissionsvorgaben (Scheelhaase und Grimme 2007:97). Auf dem siebten Treffen des Committee on Aviation Environmental Protection (CAEP) der ICAO im Februar 2007 konnten sich die 189 Mitgliedstaaten erstmalig darauf einigen, den Emissionshandel als umweltpolitische Maßnahme für den Luftverkehr, in ihren Vorschlagskatalog mit aufzunehmen (ICAO 2007c).<sup>169</sup> Zu konkreten bzw. verbindlichen Beschlüssen des CAEP ist es seitdem nicht gekommen.

In Europa gibt es seit 2005 Bestrebungen den Luftverkehr in das bereits existierende Emissionshandelssystem für stationäre Quellen zu integrieren (Europäische Kommission 2005). Ein Jahr später wurde die entsprechende Richtlinie (2003/87/EG) geändert, um 2007 die Einbeziehung des Luftverkehrs in das EU-Emissionshandelssystem ab 2011 zu beschließen (vgl. Europäische Kommission 2006a und Europäisches Parlament 2007). Bereits hier wurden erste Positionsunterschiede zwischen dem Europäischen Parlament und der Europäischen Kommission deutlich.<sup>170</sup> Die Uneinigkeiten zwischen dem Europäischem Parlament und den EU-Staaten weiteten sich 2008 auf den Prozentsatz der freien Emissionszertifikate (90 bzw. 75 Prozent), die einzuführende Kohlendioxidobergrenze sowie die mögliche Zweckbindung der generierten Mittel aus (FAZ 2008b). Innerhalb Deutschlands führte die Versteigerungshöhe der Zertifikate zu starken Kontroversen zwischen Umwelt- und Wirtschaftsministerium (SZ 2008). Im Sommer 2008 einigten sich das Europäische Parlament und der Ministerrat schließlich auf folgende Eckpunkte: Ab 2012 (und damit ein Jahr später als ursprünglich vorgesehen) werden alle in der EU beginnenden bzw. endenden Flüge in das bestehende Kohlendioxidhandelssystem einbezogen.<sup>171</sup> Den

---

<sup>169</sup> Siehe auch CAEP 2007.

<sup>170</sup> Während das Europäische Parlament sowohl den innereuropäischen als auch den interkontinentalen Flugverkehr von Anfang an mit einbeziehen wollte, plädierte die Kommission für eine zeitlich versetzte Einführung in 2011 (innereuropäisch) und 2012 (interkontinental) (Europäisches Parlament 2007).

<sup>171</sup> Zur Vereinbarkeit der EU-Richtlinie mit internationalem Recht siehe Diskussion zur Kerosinsteuer in 4.4.1. In den USA gibt es Anzeichen, dass die kommende Regierung dem Emissionshandel zustimmen könnte (siehe FAZ 2008c).

Fluggesellschaften werden 85 Prozent der Verschmutzungszertifikate kostenlos gestellt. Der übrige Anteil wird versteigert. Die Gesamthöhe (der so genannte „cap“) der zur Verfügung stehenden Zertifikate orientiert sich an den Jahresdurchschnittswerten der Basisperiode von 2004 bis 2006.<sup>172</sup> Zunächst (2012) werden Zertifikate in Höhe von 97 Prozent des Bezugszeitraums bereitgestellt. Von 2013 bis 2020 ist eine Reduzierung auf 95 Prozent gegenüber der Basisperiode geplant. Darüber hinaus soll es den Fluggesellschaften möglich sein, Zertifikate unter anderem über den Clean Development Mechanism des Kyoto-Protokolls, von Drittländern zu kaufen.<sup>173</sup> Eine Zweckbindung der eingenommenen Mittel für die unterzeichnenden 27 Mitgliedsstaaten wurde nicht vereinbart (vgl. European Parliament 2008a).

Die Reaktionen auf das Beschlusspaket fielen sehr unterschiedlich aus. Der Bundesumweltminister Gabriel sprach von einem „großen Erfolg“ (in BMU 2008). Ebenfalls begrüßt wurde die Einigung vom Bundesverkehrsminister Wolfgang Tiefensee (vgl. BMVBS 2008). Zurückhaltender fielen die Äußerungen des Berichterstatters des Europäischen Parlaments, Liese aus, der den Kompromiss zwar als „major step for the global fight against climate change“ würdigte, ihn gleichzeitig aber als „not perfect“ (beide in European Parliament 2008a) bezeichnete. Ähnlich ambivalent zeigten sich die Reaktionen weiterer Organisationen, die von „missed opportunity“ (T&E 2008) bis hin zu grundlegender Zustimmung (Verkehrsclub Deutschland in TAZ 2008b) reichten.

Eindeutig und in teilweise scharfem Ton äußerte die Industrie ihre ablehnende Haltung gegenüber den Plänen der EU (siehe Handelsblatt 2008b:5). Der Vorstandsvorsitzende der Deutschen Lufthansa, Mayrhuber, bezeichnete das Vorhaben der EU als „Irrsinn“, der neue Belastungen für Reisende schaffen würde „ohne damit dem Klimaschutz zu helfen“ (beide in BILD 2008). Die Kritik der Deutschen Lufthansa gilt dabei dem Emissionshandel in seiner jetzigen (auf Europa beschränkten) Form. Prinzipiell sieht die Fluggesellschaft darin ein durchaus „geeignetes Anreizinstrument“ (Deutsche Lufthansa 2008d:2), Kohlendioxidemissionen zu verringern.

Wie sich die Einbeziehung des europäischen Luftverkehrs in das Emissionshandelssystem sowohl auf die Angebots- als auch auf die Nachfrageseite

---

<sup>172</sup> Das Zurückgreifen auf historische Werte wird als „Grandfathering-Prinzip“ bezeichnet (Europäische Kommission 2006b:5).

<sup>173</sup> Zum Clean Development Mechanism siehe UNFCCC 2008.

auswirken wird, haben unter anderen Scheelhaase und Grimme im Auftrag des DLRs versucht, abzuschätzen (2007). Die Studie untersucht die finanziellen Belastungen und mögliche Nachfragerückgänge am Beispiel der Personenbeförderung der Deutschen Lufthansa und Ryanair (2007:101ff.). Im Rahmen der Studie wurden drei Varianten entworfen, die von unterschiedlichen Voraussetzungen ausgehen. Folgend werden lediglich die Ergebnisse der dritten Variante diskutiert, da diese hinsichtlich der gewählten Parameter (Art der Erstausrüstung an Zertifikaten, einbezogene Flugbewegungen, etc.) der aktuell von der EU beschlossenen Einführung am nächsten kommt. Für die Erstausrüstung an Zertifikaten wurde das Grandfathering-Prinzip (siehe oben) angewendet und eine Basisperiode gewählt, die im Vergleich zur jetzigen Variante der EU um ein Jahr verschoben ist (2005 bis 2007 anstelle von 2004 bis 2006). Dies schwächt die finanziellen Auswirkungen prinzipiell ab, da für die spätere Basisperiode ein höherer Kohlendioxidausstoß angenommen wurde. Die Erstausrüstung an Zertifikaten fällt daher in dem Modell von Scheelhaase und Grimme höher aus. Darüber hinaus wurden lediglich die Abflüge aus der EU erfasst, nicht jedoch die Landungen (2007:104). Diese zentralen Abschwächungen der finanziellen Belastung werden jedoch zumindest teilweise dadurch kompensiert, dass die Variante von Extremwerten (knappe Erstausrüstung, hohe Zertifikatpreise, preiselastische Nachfrage und ein hohes Emissionswachstum) ausgeht (2007:102). Trotz der beschriebenen Abweichung des Modells von der beschlossenen EU-Variante und der modellinternen Schwächen (vor allem Unsicherheiten des historischen sowie des prognostizierten Treibstoffverbrauchs) zeigen die erzielten Ergebnisse eine mögliche Größenordnung für die nun geplante Einführung auf.

Scheelhaase und Grimme kommen zu dem Schluss, dass sich selbst bei der hier vorgestellten ungünstigsten Variante „die Zusatzbelastung für Lufthansa voraussichtlich deutlich unterhalb von 1 Prozent der Erlöse aus dem Ticketverkauf der betroffenen Flüge bewegen“ (2007:111) wird. Mit maximalen Mehrkosten in Höhe von rund 71 Millionen Euro jährlich würden die Kosten deutlich unter den ölpreisanstiegbedingten Zusatzkosten liegen (vgl. Diskussion der Kerosinsteuer in 4.4.1.) (ebd.).<sup>174</sup> Zu diesem Schluss kommt auch Olivia Hartridge, die im Auftrag von Morgen Standley Commodities Fluggesellschaften auf die Einführung des Emissionshandels vorbereitet. Auf der „Greener Skies Ahead“ Konferenz am 28. Mai

---

<sup>174</sup> Ryanair hätte mit einer Zusatzbelastung von maximal drei Prozent bzw. rund 170 Millionen Euro jährlich zu rechnen (Scheelhaase und Grimme 2007:107).

2008 in Berlin (folgend GSAK genannt) äußerte sie hierzu: „The carbon bill is not nearly as significant as the fuel bill“. Auch der zu erwartende Nachfragerückgang würde je nach Art der Überwälzung der Kosten auf die Passagiere (nur auf Geschäftsreisende bzw. gleichmäßig auf alle Passagier) mit 0,3 bzw. 1 Prozent gering ausfallen (Scheelhaase und Grimme 2007:109).

Während die unmittelbaren finanziellen Zusatzbelastungen auf die Angebots- bzw. Nachfrageseite damit als moderat zu bewerten sind, liegt die Gefahr des europäischen Emissionshandels in möglichen Wettbewerbsverzerrungen. Diese könnten sowohl innereuropäischen zwischen Fullservice-Carriern und Low-Costcarriern als auch zwischen Fluggesellschaften in Europa und weiteren Ballungsräumen auftreten. Analog zu einer EU-weiten Kerosinsteuer könnten sich dann Verkehrsströme zwischen Nordamerika und dem mittleren bzw. fernen Osten auf arabische und nordafrikanische Kreuze verlagern (Scheelhaase und Grimme 2007:111). Diesen „shift out of Europe“ befürchtet auch Haag, Leiter der Abteilung Umweltkonzepte Konzern bei der Deutschen Lufthansa, der den Emissionshandel nicht für die „silver bullet“ (beide auf der GSAK) hält.

Die emissionshandelsbedingten Veränderungen im Wettbewerb zwischen europäischen und nordamerikanischen Fluggesellschaften untersuchten Scheelhaase et al. genauer in einer weiteren Studie. Da die Deutsche Lufthansa bei der Abwicklung von Interkontinentalflügen auf innereuropäische Zubringerflüge (so genannte „feeder“) angewiesen ist, entstehen durch das europäische Emissionshandelssystem „significant competitive advantages“ (Scheelhaase et al. 2007:23) für nordamerikanische Fluggesellschaften, dessen Zubringer keinem Zertifikathandel unterliegen.<sup>175</sup> Zudem liegt die geschätzte finanzielle Belastung für die Deutsche Lufthansa in dieser Studie mit gut 100 Millionen Euro (bei moderatem Emissionsanstieg) deutlich über dem Ergebnis der ersten Untersuchung (siehe oben).

Die ab 2012 auf die europäischen Fluggesellschaften zukommenden Belastungen dürften gar noch höher ausfallen, da die Studie einen relativ geringen Preis von 20 Euro pro Kohlendioxidtonne zugrunde legte und nicht wie angenommen drei, sondern 15 Prozent der Zertifikate ersteigert werden müssen. Emissionshandelskritiker sprechen von jährlichen Belastungen der Industrie in Höhe von 15 Milliarden Euro (Mücke und Kraemer 2008). Die Vereinigung der

---

<sup>175</sup> An den Flughäfen Frankfurt und München nutzen bei der Deutschen Lufthansa auf der Langstrecke etwa 60 Prozent der Passagiere zuvor einen Zubringerflug (Scheelhaase et al. 2007:7).

europäischen Fluggesellschaften (Assosiation of European Airlines, AEA) geht für die gesamte europäische Luftfahrt von einer Zusatzbelastung in Höhe von 4,8 Milliarden Euro pro Jahr aus (in FAZ 2008d). Auf die Deutsche Lufthansa komme nach eigenen Angaben ein „mittlerer dreistelliger Millionen-Euro-Betrag jährlich“ (Deutsche Lufthansa Sprecher Schneckenleitner in Die Welt 2008c) zu.

Sollte der Zertifikathandel wie geplant eingeführt werden, prognostizieren einzelne Stimmen „a bloodbath“ unter den Fluggesellschaften.<sup>176</sup> Zum jetzigen Zeitpunkt liegen noch keine konkreten Abschätzungen für die Konsequenzen des Emissionshandels in seiner gerade beschlossenen Form vor. Es gilt jedoch als unwahrscheinlich, dass es zu dem gezeichneten „Blutbad“ kommen wird.<sup>177</sup> Dennoch werden signifikante Auswirkungen auf die Fluggesellschaften nicht ausbleiben.<sup>178</sup> Die Industrie muss sich sowohl auf finanzielle Herausforderungen als auch auf einen veränderten Wettbewerb einstellen. Dies gilt in begrenztem Maße auch für die Nachfragerseite. Je nachdem, in welchem Umfang die Belastungen an die Passagiere weiter gegeben werden, wird bis 2020 laut Europäischer Kommission derzeit mit einer Erhöhung der Flugpreise von etwa 10 Euro auf innereuropäischen und 40 Euro auf Interkontinentalflügen gerechnet (vgl. FAZ 2008d und Focus 2008). Abschließend bleibt festzuhalten, dass die beschlossene Einbeziehung des europäischen Luftverkehrs in den Emissionshandel das derzeit konkreteste und stärkste Mittel ist, den Kohlendioxidausstoß ökologisch effektiv und ökonomisch effizient zu mindern. Angesichts der derzeitigen Stagnation der Weltwirtschaft (vgl. 2.1.3.) besteht allerdings aus Sicht des Autors die Gefahr, dass der Emissionshandel abgeschwächt oder verzögert werden könnte.<sup>179</sup> Greenpeace sieht diese Gefahr bisher nicht (Smid im Expertengespräch).

Die zu erwartenden Wettbewerbsverzerrungen werden durch die Erfassung aller europäischer Flugbewegungen (unabhängig ihres Herkunftslandes) geringer ausfallen als unter den zuvor diskutierten Varianten.<sup>180</sup> Es darf angenommen werden, dass die Anwendung des Verursacherprinzips in Kombination mit der gewählten Mengenlösung den Druck auf Fluggesellschaften über Europa hinaus

---

<sup>176</sup> Äußerung des BARIG Executive Committee Mitglieds und Leiter der Aeropolitical Affairs bei TUIfly, von Heeremann auf der GSAK.

<sup>177</sup> Diese Einschätzung teilt auch das DLR, welches das Gesamtwachstum der europäischen Branche durch den Emissionshandel „not endangered“ (Grimme auf der GSAK) sieht.

<sup>178</sup> Dieser Ansicht ist auch Frota im Expertengespräch.

<sup>179</sup> Für die Automobilindustrie sind Lockerungstendenzen der Reduktionsvorgaben bereits zu erkennen (siehe European Parliament 2008c und Der Spiegel 2008c).

<sup>180</sup> Beispielweise bei einer alleinigen Erfassung europäischer Fluggesellschaften oder bei einer reinen Start- bzw. Landeerfassung (vgl. Europäisches Parlament 2007).

erhöhen wird, in kohlendioxid-effiziente Technologien zu investieren (vgl. Lueg 2007:13). Einmal installiert, können die Parameter (Anteil der kostenlosen Zertifikate, Zukaufsrechte, etc.) mit verhältnismäßig geringem Aufwand an mittel- bis langfristige Entwicklungen und Ziele angepasst werden.

Die kohlendioxid-fernen Emissionen werden durch den beschlossenen Zertifikathandel weiterhin nicht erfasst. Dies liegt unter anderem daran, dass die wissenschaftliche Bewertung dieser Emissionen noch nicht abgeschlossen ist (vgl. Diskussion des Strahlungsantriebs in Kapitel zwei sowie Sausen 2007b). Gelingt es der Forschung, die bestehenden Lücken zu schließen, wäre eine nachträgliche Integration der kohlendioxid-fernen Flugverkehrsemissionen prinzipiell denkbar. Insbesondere wenn sich der politische Druck ändert, wie es unter den nun zu diskutierenden Szenarienvoraussetzungen der Fall ist.

Selbst unter einem starken Rückgang des politischen Drucks, wie ihn das LBS gegen Ende annimmt, dürfte der Austritt der Luftfahrtbranche aus einem bestehenden Emissionshandelssystem als unwahrscheinlich gelten. Begründen lässt sich diese Annahme mit der Erfahrung, dass die Mitgliedsstaaten selten bereit sind, auf bestehende Finanzquellen zu verzichten, besonders wenn diese nicht unerheblich ausfallen (siehe diskutierte Summen oben). Zudem ist die Stärkung der Industrieposition in dem LBS im Wesentlichen auf die neuen (entlastenden) Erkenntnisse im Bereich der Kondensstreifen zurückzuführen. Da diese ohnehin durch den Emissionshandel unerfasst bleiben, wäre eine Desintegration des Luftverkehrs aus diesem Grund kaum zu rechtfertigen. Durch die festgestellte, geringere Erderwärmung würden sich jedoch prinzipiell die Chancen erhöhen, dass die Reduktionsvorgaben gelockert bzw. weniger stark verschärft würden. Die Reduzierung der Kohlendioxidemissionen auf 95 Prozent gegenüber der Basisperiode (siehe oben) könnte dann über 2020 hinaus bestehen bleiben oder gar um einige Prozentpunkte erhöht werden.

Eine gegensätzliche Entwicklung wäre im Falle des UBS zu erwarten. Hier wäre eine weitere Absenkung der zur Verfügung stehenden Zertifikate auf 90, 70 oder weniger Prozent sehr wahrscheinlich. Unter hohem politischem Druck wäre eine solche Verschärfung mit geringem zusätzlichem Verwaltungsaufwand weitgehend problemlos durchführbar. Zusätzlich wären intensivierete Bestrebungen zu erwarten, die kohlendioxid-fernen Emissionen des Luftverkehrs in das Handelssystem zu integrieren sowie einen Weg zu finden, das Nebenprodukt der künstlichen

Wolkenbildung zu erfassen (vgl. 2.2.). Neben diesen internen Strukturveränderungen wäre zudem eine Ausweitung des Emissionshandelssystems über Europas Grenzen hinaus als wahrscheinlich zu erachten. Insbesondere Nordamerika dürfte massive Probleme bekommen, sich dann weiterhin dem Zertifikathandel zu verweigern (vgl. FAZ 2008c). Inwieweit dies für weitere Weltregionen (insbesondere dem Nahen und Mittleren Osten sowie Asien) gilt, lässt sich heute kaum abschätzen.

Über den Emissionshandel als indirektes Instrument hinaus wären zudem direkte Eingriffe der Staaten prinzipiell denkbar. Angefangen von einer Regulierung der Anzahl an Luftverkehrsgesellschaften über eine begrenzte Zulassungsvergabe bis hin zu einer Koppelung der Streckenrechtsvergabe an die Klimawirksamkeit einzelner Flugzeugtypen bzw. Flotten könnte die Ordnungspolitik aktiv werden. Weiter könnten Staaten im Alleingang oder in Kooperation mit anderen eine Unterpreisgrenze für Flugtickets festlegen, um über ein gebremstes Wachstum die Klimawirksamkeit des Luftverkehrs zu mindern.

Sicherlich sind die unter UBS Voraussetzungen aufgezeigten Maßnahmen nur schwerlich mit dem heutigen Verständnis einer freien Marktwirtschaft zu vereinbaren, dennoch zeigen sie, dass neben dem Hauptinstrument des Emissionshandels noch weitere (flankierende) ordnungspolitische Optionen existieren.

#### **4.5. Zwischenfazit**

Die einzelnen Flugzeugkomponenten sowie das Flugzeug in seiner Gesamtheit haben heute einen sehr hohen technischen Reifegrad erreicht. Das verbleibende Effizienzsteigerungspotenzial ist demzufolge gering und oftmals nur durch einen hohen zusätzlichen Kostenaufwand zu erschöpfen (4.1.). Der Antrieb wird, wie in der Vergangenheit, auch auf absehbare Zeit der wichtigste Innovationsträger des Flugzeugs bleiben (4.1.1.). Vor allem auf der Kurz- bis Mittelstrecke wird der Getriebefan ab 2013 und möglicherweise der Propfan nach 2020 größere Kerosineinsparungen und damit Emissionsreduktionen erzielen können (ebd.). Im Bereich der Flugzeugstruktur wird der Anteil des Verbundstoffs zunehmen, ohne hierbei einen wesentlichen Beitrag zur Reduzierung des Flugzeuggesamtgewichts zu leisten (Begründung siehe 4.1.3.). Die Laminartechnik könnte die Gesamtaerodynamik deutlich verbessern. Ihr Einsatz erweist sich jedoch als komplex und kostenintensiv (ebd.). Wichtige technologische „Durchbrüche“ (vgl. Einleitung

Kapitel vier) sind damit bis 2020 nicht zu erkennen. Weder die Triebwerke noch die Flugzeugstruktur werden die vom ACARE angestrebten Reduktionsbeiträge zur Halbierung der Kohlendioxidemissionen leisten. Ob das Luftverkehrsmanagement den erwarteten Beitrag (fünf bis zehn Prozent) erfüllen kann, hängt maßgeblich von der weiteren Entwicklung des Single European Skys ab (vgl. 4.3.). Angesichts der unter 4.3. identifizierten Komplexität der Akteurskonstellation und des begrenzten Zeitfensters (bis 2020) kann angenommen werden, dass der Beitrag des Luftverkehrsmanagements eher im unteren Bereich der genannten Erwartungsspanne liegen wird. Das Gesamtreduktionsziel für Kohlendioxid (minus 50 Prozent) wird damit mit hoher Wahrscheinlichkeit nicht erreicht. Noch deutlicher wird die Reduzierung der Stickoxide (um 80 Prozent) verfehlt werden, da der Antrieb als alleiniger Einflussparameter hierauf einer ganzen Reihe von Zielkonflikten gerecht werden muss (vgl. 4.1.1.). Zusätzlich erschwerend wirkt das Ziel der Lärmreduzierung, welches im Rahmen dieser Arbeit zwar nicht im Zentrum steht, als Randbedingung jedoch stets mitgedacht werden muss. Während eine exklusive Fokussierung auf ein Ziel möglicherweise erfolgreich wäre, scheint die parallele Verwirklichung der drei Ziele (Kohlendioxid, Stickoxid und Lärm) aus heutiger Sicht sehr unwahrscheinlich. Dies ist besonders durch die geführten Expertengespräche mit Reske, Frota, Nagel, Granzeier und Bräunling sehr deutlich geworden (vgl. Anhang B).

Die Betrachtung der technischen Ansätze hat zudem gezeigt, dass die starke Abhängigkeit der Luftfahrt vom Rohöl über die kommenden Jahrzehnte weiter bestehen wird. Aus umweltpolitischer Sicht sind BtL (Biomass to Liquid) sowie Biokraftstoffe der zweiten und dritten Generation mittelfristig potentiell geeignete Alternativen zu rohölbasiertem Treibstoff (4.1.2.). Wann und in welchem Umfang diese Alternativkraftstoffe einen signifikanten Anteil am gesamten Treibstoffverbrauch des Luftverkehrs erlangen können, wird maßgeblich von ihrer Verfügbarkeit, Wirtschaftlichkeit und Nachhaltigkeit abhängen. Prinzipiell ist ein kohlendioxidemissionsfreier Flugverkehr ausschließlich über den Einsatz von Wasserstoff zu realisieren. Vorausgesetzt die Klimawirksamkeit eines wasserstoffbetriebenen Flugzeugs würde sich als unproblematisch erweisen (vgl. 2.2.2.), könnte dies eine erstrebenswerte Technologie sein. Da die Nutzung von Wasserstoff als Primärtreibstoff erheblich größere Tanks erfordert als herkömmliches Kerosin, wären umfangreiche Änderungen des derzeitigen Flugzeugdesigns und



damit verbundene Infrastrukturanpassungen am Boden unumgänglich (4.1.2.). Aus diesem Grund ist die Umstellung auf Wasserstoff eine langfristige Perspektive, die insbesondere an den weiteren Fortschritt des BWB (Blended Wing Body) Konzepts gekoppelt ist (siehe Szenario in 4.1.3.).

Im Vergleich zu den technischen Möglichkeiten ist der operative und strategische Spielraum für weitere Treibstoffeinsparung sehr klein (4.2.). Innovationen wie das Cyclean Engien Wash zeigen, dass zusätzliche Reduktionen möglich sind. Diese sind auf den Gesamtausstoß der Luftfahrt bezogen jedoch minimal (4.2.1.). Operationskonzepte wie die Luftbetankung oder der Formationsflug sind angesichts des heutigen Managements des europäischen Luftraums, Visionen (4.2.3.). Zunächst muss der Single European Sky vollständig verwirklicht werden. Hierzu ist besonders eine Änderung des verfolgten Ansatzes hin zu einer Top-Down-Struktur nötig. Zudem muss verhindert werden, dass die Bildung der funktionalen Luftraumblöcke zu einer neuen Manifestierung von eingeschränkt kompatiblen Einzelparzellen führt (4.3.).

Hauptabschnitt 4.4. hat verdeutlicht, dass der Politik theoretisch ein breites Spektrum an Einflussoptionen zur Reduzierung der Klimawirksamkeit des Luftverkehrs zur Verfügung steht. In der Praxis wird hiervon auf nationaler und insbesondere auf internationaler Ebene bisher kaum Gebrauch gemacht. Besonders bei der Anwendung auf die administrativen Instrumente hat der Szenarienansatz eine Reihe von potentiell effektiven Maßnahmen hervorgebracht (4.4.2.). Diese reichen von Geschwindigkeits-, Flughöhen und (temporären) Regionsbeschränkungen bis hin zu einem Verbot von Flugverbindungen unter einer bestimmten Streckenlänge. Aus heutiger Sicht mögen diese Eingriffe in den Flugbetrieb drastisch erscheinen. Die entsprechenden (Szenarien-)Bedingungen vorausgesetzt, können sie jedoch ein mögliches Moment sein. Bisher setzt die Politik dagegen vor allem auf das finanzpolitische Instrument der Steuern. Unterabschnitt 4.4.1. diskutierte verschiedene Einführungsvarianten im Hinblick auf Effektivität und Wettbewerbsgerechtigkeit der Kerosinsteuer. Es wurde gezeigt, dass die Besteuerung von Kerosin ein wirksames, wenn auch nicht unproblematisches Mittel der (umwelt-)politischen Lenkung ist. Unbestritten ist, dass die Fluggesellschaften und damit auch die Hersteller wie kaum eine andere Industrie ein sehr großes wirtschaftliches Eigeninteresse an einem möglichst effizienten Einsatz von Kerosin haben. Aus Sicht des Autors ist dies jedoch kein valides Argument für eine Steuerbefreiung des internationalen Flugverkehrs. Dabei ist es nicht Gegenstand

dieser Arbeit, eine Einschätzung darüber zu treffen, ob die Luftfahrtindustrie ihren monetären Beitrag bereits über die Eigenfinanzierung der Infrastruktur zahlt (Argumentation Waibel im Expertengespräch) oder im Gegenteil hier subventioniert wird (Argumentation Smid im Expertengespräch). Hier wird lediglich festgehalten, dass eine Kerosinbesteuerung als eine durchaus sinnvolle flankierende Maßnahme gesehen wird. Derzeit ist die Kerosinsteuer jedoch durch die Diskussion um den Emissionszertifikathandel in den Hintergrund gerückt.

Die Einbeziehung des europäischen Luftverkehrs in den Emissionshandel ab 2012 ist ein wichtiger und richtiger Schritt, der weder verzögert noch abgeschwächt werden sollte. Im Gegenteil sollte der Emissionshandel, den entsprechenden wissenschaftlichen Kenntnissstand vorausgesetzt, um die Erfassung kohlendioxidferner Emissionen erweitert werden. Für die Fluggesellschaften und Hersteller bedeutet der Zertifikathandel bereits in seiner heute beschlossenen Form einerseits eine zusätzliche finanzielle Belastung, andererseits die Eröffnung von neuen Chancen und Perspektiven (vgl. 4.2.1.). Es ist anzunehmen, dass der Emissionshandel die unter 4.2.2. gezeichnete Erneuerung der Globalflotte und damit die Senkung des Kerosinverbrauchs beschleunigen wird. Insgesamt hat die Auseinandersetzung mit den politischen Instrumenten (4.4.) in Kombination mit den vorangegangenen Hauptabschnitten (4.1. bis 4.3.) einige allgemeine Erkenntnisse gebracht. Die Einführung und Umsetzung von internationalen Maßnahmen, wie sie für den Luftverkehr angebracht sind, müssen komplexen Souveränitätsansprüchen der beteiligten Staaten gerecht werden (vgl. Diskussion zu Kerosinsteuer, Emissionshandel und Single European Sky). Zudem muss sich jedes politische Instrument dem Zielkonflikt aus effektiver Umweltpolitik und Vermeidung einer übermäßigen Belastung von Teilen bzw. der gesamten Industrie stellen. Angesichts des hohen Reifegrads der herkömmlichen Technik (4.1.) und des engen operativen Fensters (4.2.) können Fluggesellschaften und Hersteller nur begrenzt und zudem überwiegend mittel- bis langfristig auf Anreize zur Emissionssenkung reagieren. Um diesen Aspekten gerecht zu werden und die Akzeptanz der Industrie zu fördern, sollten die aus politischen Instrumenten gewonnenen Finanzmittel der Luftfahrtforschung (wie etwa dem NACRE Projekt) zugeführt werden.

## 5. Gesamtfazit und Ausblick

Das Primärziel dieser Arbeit war es, einen Überblick über die wichtigsten Ansätze zur Reduzierung der Klimawirksamkeit der globalen Zivillufftfahrt zu geben. In diesem Zusammenhang stellte sich die Frage, ob die derzeit verfolgten Ansätze ausreichend sind, um die Klimawirksamkeit der globalen Zivillufftfahrt kurz- (heute bis etwa 2020), mittel- (2020 bis 2030) und langfristig (2030 und darüber hinaus) effektiv zu begrenzen. Die Ausgangslage hierzu hat Kapitel zwei gezeichnet. In Abhängigkeit der weltweiten Konjunktur ist zu erwarten, dass sich das Wachstum des globalen Flugverkehrsaufkommens in den kommenden ein bis zwei Jahren verlangsamen wird. Analog zu den bisherigen Reaktionen auf Krisenphasen dürfte der Luftverkehr im Anschluss wieder deutlich stärker wachsen. Bis 2025 gehen Schätzungen von einer Verdoppelung und Verdreifachung des globalen Passagier- bzw. Frachtaufkommens aus. Die Auseinandersetzung mit den operativen und strategischen Ansätzen hat gezeigt, dass hier kurz- bis mittelfristig keine signifikanten Emissionsreduktionen zu erwarten sind. Auch die Analyse der infrastrukturellen Neuordnung des europäischen Luftraums lässt auf einen geringen Beitrag zur Minderung der Klimawirksamkeit schließen. In Form des europäischen Emissionshandels kommt ab 2012 zum ersten Mal ein politisches Instrument zur Anwendung, welches die Emissionshöhe des europäischen Luftverkehrs potenziell senken könnte. Da der Zertifikathandel jedoch in seinem Wirkungshorizont (nur Kohlendioxid) sowie seiner geographischen Ausdehnung (auf Europa) beschränkt ist, müssten die wesentlichen Reduktionsbeiträge durch den technologischen Fortschritt geleistet werden. Kurzfristig ist hier jedoch der Getriebefan die einzige Technologie, die einen größeren Sprung hinsichtlich der Treibstoffeffizienz verspricht. Der Einsatz der Technologie könnte auf die Kurz- bis Mittelstrecke beschränkt sein. Die weitere Untersuchung hat gezeigt, dass die klimarelevanten Ziele (Reduzierung der Kohlendioxid- und Stickoxidemissionen um 50 bzw. 80 Prozent gegenüber 2000) des Beirats für Aeronautische Forschung in Europa (ACARE) bis 2020 sehr wahrscheinlich verfehlt werden. Zu den ACARE Zielen sei hier angemerkt, dass selbst ihre Erreichung nicht notwendigerweise mit einer effektiven Begrenzung der Luftverkehrsemissionen einhergehen würde, da sie sich zum einen auf Europa beschränken und zum anderen eine relative (pro Sitz und Flugkilometer) und keine absolute Reduzierung anstreben. Die Verfehlung der Ziele ist zudem mit keinen

Konsequenzen verbunden, da es sich um eine Art freiwillige Selbstverpflichtung der Industrie handelt. Des Weiteren ist zu betonen, dass der Aspekt der künstlichen Wolkenbildung durch den ACARE keinerlei Berücksichtigung findet. Angesichts dessen, kann die eingangs gestellte Frage auf kurze Sicht klar verneint werden.

Auch mittelfristig kann eine effektive Begrenzung der Klimawirksamkeit als sehr unwahrscheinlich bewertet werden. Sollte es zur Einführung des Propfans kommen, wird diese auf kürzere Strecken (auf denen Geschwindigkeit eine untergeordnete Rolle spielt) beschränkt sein. Weitere Effizienzsteigerungen könnten durch die Laminartechnik realisiert werden, wobei hier zunächst die Kosten- und Komplexitätsfragen beantwortet werden müssen. In etwa 10 bis 20 Jahren könnten nachhaltige synthetische Treibstoffe und Biokraftstoffe der zweiten und dritten Generation einen Beitrag zur Reduzierung der Klimawirksamkeit leisten. Wann genau dieser Beitrag ein signifikantes Niveau erreichen wird, lässt sich derzeit nicht sagen.

Die Unsicherheiten werden mit zunehmendem Zeithorizont größer. Langfristig scheint eine effektive Begrenzung der Luftverkehrsemissionen derzeit nur über den Einsatz von Wasserstoff möglich. Vorausgesetzt der damit verbundene wolkeninduzierende Effekt würde sich als deutlich geringer erweisen als die Wirkung der herkömmlichen Emissionen, wäre dies eine erstrebenswerte Option. Ihre Verwirklichung hätte weitreichende Konsequenzen. Einerseits würde die Einführung von Wasserstoff als Primärtreibstoff einen Bruch mit dem konventionellen Flugzeugdesign bedeuten und eine umfangreiche Anpassung der Bodeninfrastruktur bedingen. Andererseits würden radikal neue Perspektiven des Fliegens („Leben an Board“) ermöglicht. Aufgrund der erforderlichen Tankgröße wäre ein solches Konzept, beispielsweise in Form eines Blended Wing Bodys, jedoch ausschließlich für den Einsatz auf der Langstrecke geeignet. Daher wird es auch langfristig eine sehr große Herausforderung bleiben, die Klimawirksamkeit des Luftverkehrs mit technischen Lösungen zu begrenzen.

Vor diesem Hintergrund wurde die zweite Leitfrage in den Untersuchungskontext aufgenommen: Welche Ansätze sind über die derzeit verfolgten hinaus möglich und empfehlenswert? Zur Beantwortung der Frage wurden in Kapitel drei zwei Szenarien entworfen, die an ihrem Ende zu unterschiedlichen Drucksituationen führen. Angewendet auf die einzelnen Abschnitte in Kapitel vier fiel der erzielte Erkenntnisgewinn sehr unterschiedlich aus. Während sich bei den technischen

Ansätzen und dem Single European Sky im Wesentlichen nur Einflusstendenzen auf bestehende Entwicklungen ausmachen ließen, schaffte vor allem das Upper Bound Szenario (UBS) eine Grundlage für die Umsetzung visionärer Operationskonzepte. Erhebliche Fortschritte im Luftverkehrsmanagement vorausgesetzt, könnten der Formationsflug sowie die Luftbetankung wesentliche Treibstoffeinsparungen bewirken. Den größten Erkenntnisgewinn brachte der Szenarienansatz im Bereich der politischen Instrumente, da diese bisher international kaum genutzt werden. Sollte sich ergeben, dass der globale Zivilluftverkehr zu fast einem Viertel für den Gesamtstrahlungsantrieb verantwortlich ist (UBS), könnte in wenigen Jahren ein quantitativer Rückgang des Flugaufkommens durch eine hohe internationale Kerosinbesteuerung herbeigeführt werden. Zusätzlich könnten die administrativen Instrumente durch weitreichende Eingriffe in die (horizontale, vertikale und zeitliche) Flugstreckenplanung den wolkeninduzierenden Effekt der Luftverkehrsemissionen deutlich reduzieren. Sollten sich diese als nicht ausreichend erweisen, wären unter UBS Bedingungen weitere Maßnahmen wie die Festlegung einer Mindestflugstreckenlänge (und damit eine Veränderung des Modal Splits) denkbar und empfehlenswert. Sollte sich dagegen herausstellen, dass die Wasserstoffemissionen des Flugverkehrs kaum klimarelevant sind (Lower Bound Szenario), wären solche Schritte nicht zu rechtfertigen. Die Integration des Flugverkehrs in den Emissionshandel wäre jedoch selbst unter LBS Bedingungen nötig, da der technische Fortschritt um Faktoren unter den Zuwachsraten des Flugverkehrsaufkommens liegt. Die von den Fluggesellschaften hiergegen angeführten Argumente (unter anderem Wettbewerbsverzerrung, Mehrfachbelastung durch Kerosinpreishöhe sowie Eigenfinanzierung der Infrastruktur) wurden durch die Expertengespräche mit der Deutschen Lufthansa transparenter. Aus betriebswirtschaftlicher Sicht ist die Ablehnung jeglicher Zusatzbelastungen verständlich. Aus umweltpolitischer Perspektive ist es dagegen nicht zu rechtfertigen, dass ein ganzer Verkehrssektor, der weiter an Bedeutung gewinnen wird, von jeglicher Emissionsreduktionsvorgabe befreit bleibt. Um die zu Beginn dieser Untersuchung angesprochenen ambitionierten Klimaziele zu erreichen, ist es unumgänglich, dass jedes Glied der Emittentenkette seinen Beitrag zum Klimaschutz leistet. Aufgrund des sehr hohen Reifegrads der herkömmlichen Flugzeugtechnologie und der besonderen Anforderungen der Branche (unter anderem an Sicherheit und internationaler Kompatibilität) lassen sich weitere

Emissionseinsparungen in der Luftfahrt nur unter großen Anstrengungen realisieren. Mit dem Ziel, diese zu initiieren, muss die Politik unter Berücksichtigung aller klimarelevanten Luftverkehrsemissionen ihren Handlungsspielraum erweitern und die Entwicklung und Einführung neuer Technologien gezielt finanziell unterstützen. Für die Fluggesellschaften müssen zusätzliche Anreize gesetzt werden, in treibstoffeffizientere Technologien zu investieren. Darüber hinaus müssen alle Beteiligten an der Verbesserung der Rahmenbedingungen arbeiten. Mit Blick auf die Effizienz des europäischen Luftraums ist die Umsetzung des Single European Sky dringend erforderlich. Hierbei gilt es vor allem die Kompatibilität der einzelnen Luftraumblöcke sowie deren Ausrichtung an den Verkehrsströmen sicher zu stellen. Grundlegend hat die Auseinandersetzung mit der Bewertung der Klimawirksamkeit des Luftverkehrs verdeutlicht, dass der zur Zeit verwendete Strahlungsantrieb als zentrale Messgröße Schwächen aufweist. Zudem unterschätzt der Strahlungsantrieb den klimarelevanten Einfluss des Luftverkehrs durch die Ausklammerung des Zirreneffekts möglicherweise deutlich. Hier liegt es an der Forschung sowohl eine verbesserte Messgröße zur Erfassung der Strahlungswirkung zu entwickeln, als auch die bestehenden Kenntnislücken im Bereich der Wolkenbildung zu schließen. Forschungsprojekte wie AEROTROP, QUANTIFY und OMEGA werden hier in naher Zukunft wichtige Erkenntnisse liefern (siehe Junior Research Group AEROTROP 2007, Borken-Kleefeld et al. 2008 und University of Leeds 2008). Wie fundamental sich die Ergebnisse der Projekte auswirken könnten, hat der Szenarienansatz aufgezeigt.

## Literatur

Airbus (Hrsg.) (2007a): Global Market Forecast 2007 - 2026. Ohne Verlagsangabe. Blagnac Cedex.

Arndt, N. (2007): Environmentally Friendly Aero-engines for the 21st Century. Beitrag zur 1st CEAS (Council of European Aerospace Societies) European Air and Space Conference. Berlin.

ATAG - Air Transport Action Group (Hrsg.) (2008a): The Economic and Social Benefits of Air Transport 2008. Ohne Verlagsangabe. Genf.

Barrett, M. (2004): Pollution Control Strategies for Aircraft. Senco. Colchester,

Bauerfeind, K. (1999): Steuerung und Regelung der Turboflugtriebwerke. Birkhauser. Basel.

Baumgartner, M. (2007): The Organisation and Operation of European Airspace. In: Cook, A. (Hrsg.) (2007): European Air Traffic Management. S. 1-34. Ashgate. Burlington.

Bennington, M. und K. Visser (2006): Aerial Refueling Implications for Commercial Aviation. In: Journal of Aircraft 42 (2). S. 366-375.

BILD (Hrsg.) (2008): Lufthansa attackiert Klimapolitik der EU. Vom 26.06.2008.

BMBF - Bundesministerium für Bildung und Forschung (Hrsg.) (2008): Pflanzen als Rohstoffe für die Zukunft. Ohne Verlagsangabe. Bonn.

BMJ - Bundesministerium der Justiz (Hrsg.) (2007): Umsatzsteuergesetz. Berlin.

Boeing (2008a): Current Market Outlook 2008-2027. Ohne Verlagsangabe. Seattle.

Boggia, S. und K. Rüd (2004): Intercooled Recuperated Aero Engine. Ohne Verlagsangabe. München.

Borken-Kleefeld, J., P. Hoor, D. Caro, O. Dessens, O. Endresen, M. Gauss, V. Grewe, D. Hauglustaine, I. Isaksen, P. Joeckel, J. Lelieveld, E. Meijer, D. Olivie, M. Prather, C. Schnadt-Poberaj, J. Staehelin, Q. Tang, J. Aardenne, P. van Velthoven und R. Sausen (2008): The Impact of Traffic Emissions on Atmospheric Ozone and OH - Results from QUANTIFY. In: Atmospheric Chemistry and Physics 8 (5). S. 18219-18266.

Bows, A., K. Anderson und P. Upham (2009): Aviation and Climate Change. Routledge. New York.

BP - British Petroleum (Hrsg.) (2008): BP Statistical Review of World Energy - June 2008. Beacon Press. London.

Bräunling, W. (2001): Flugzeugtriebwerke - Grundlagen, Aero-Thermodynamik, Kreisprozesse, thermische Turbomaschinen, Komponenten und Auslegungsberechnungen. Springer. Berlin.

Bräunling, W. (2004): Flugzeugtriebwerke - Grundlagen, Aero-Thermodynamik, Kreisprozesse, thermische Turbomaschinen, Komponenten und Emissionen. Springer. Berlin.

Braun-Unkhoff, M. und P. Le Clercq (2008): Mit der Kraft von Pflanzen und Algen - Alternative Treibstoffe in der Luftfahrt. In: Nachrichten Magazin des Deutschen Zentrums für Luft und Raumfahrtzentrum 119. S. 29-31.

Brich, N. (2000): 2020 Vision - The Prospects for Large Civil Aircraft Propulsion. In: Aeronautical Journal 104. S. 347-352.

Brosthaus, J., J. Schneider, K. Sonnborn, G. Weyrauther, R. Hopf, H. Kuhfeld, M. Schmied, A. Köhn, B. Limprecht, A. Pastowski, R. Petersen, K. Schallaböck und G. Winter (2000): Maßnahmen zur verursacherbezogenen Schadstoffreduzierung des zivilen Flugverkehrs. Deutsches Institut für Wirtschaftsforschung. Köln.

Burkhardt, U., C. Fichter, V. Grewe, J. Hendricks, B. Kärcher, S. Pechtl, M. Ponater, R. Sausen und A. Stenke (2006): Klimaauswirkungen des Luftverkehrs. Beitrag zur 7. Deutschen Klimatagung. München.

Button, K. (2005): The Taxation of Air Transportation. Center for Transportation Policy, Operations and Logistics. Fairfax.

CAEP - Committee on Aviation Environmental Protection (2007): Report of the Committee on Aviation Environmental Protection, Seventh Meeting in Montréal, 5 - 16 February 2007. Montréal.

CFMU - Central Flow Management Unit (Hrsg.) (2008): Network Operations Report 2007. Ohne Verlagsangabe. Maastricht

Clement, W., H. Fogt, A. Geisler, E. Huchler, S. Krautsack, W. Rohmberg, H. Schmitt-Bischoffshausen und M. Weber (2008): FTI-Luftfahrtstrategie - Österreichische Forschungs-, Technologie- und Innovationsstrategie für die Luftfahrt 2008. Ohne Verlagsangabe. Wien.

Cook, A. (Hrsg.) (2007): European Air Traffic Management. Ashgate. Burlington.

Corchero, G., J. Montañés, D. Pascovici und S. Ogaji (2008): An Insight Into Some Innovative Cycles for Aircraft Propulsion. In: Aerospace Engineering 222. S. 731-747.

Der Spiegel (1973): Viele Millionen. In: Der Spiegel vom 29.10.1973. S. 130-131.

Der Spiegel (1995): Flug bis zur Grenze. In: Der Spiegel vom 27.2.1995. S. 175-176.

Deutsche Lufthansa (Hrsg.) (2002): Balance - Ausgabe 2001/2002. Ohne Verlagsangabe. Frankfurt.



Deutsche Lufthansa (Hrsg.) (2005): Politikbrief Mai 2005. Ohne Verlagsangabe. Frankfurt.

Deutsche Lufthansa (Hrsg.) (2007a): Balance - Das Wichtigste zum Thema Nachhaltigkeit bei Lufthansa. Ohne Verlagsangabe. Frankfurt.

Deutsche Lufthansa (Hrsg.) (2007b): Der „Drei-Liter-Riese“. In: Lufthansa Airbus A380 Newsletter 3.

Deutsche Lufthansa (Hrsg.) (2008a): Balance - Das Wichtigste zum Thema Nachhaltigkeit bei Lufthansa. Ohne Verlagsangabe. Frankfurt.

Deutsche Lufthansa (Hrsg.) (2008b): Politikbrief Spezial Umwelt. Ohne Verlagsangabe. Frankfurt.

Deutsche Lufthansa (Hrsg.) (2008c): 1. Zwischenbericht Januar-März 2008. Ohne Verlagsangabe. Frankfurt.

Deutsche Lufthansa (Hrsg.) (2008d): Politikbrief Juni 2008. Ohne Verlagsangabe. Frankfurt.

Die Zeit (Hrsg.) (2008b): Kommt die Ticket-Tax? Vom 05.04.2008.

Dobruszkes, F. (2006): An Analysis of European Low-cost Airlines and Their Networks. In: Journal of Transport Geography 14. S. 249-264.

Doshi, F., R. Lessem und D. Mooney (2000): The Safe Distance Between Airplanes and the Complexity of an Airspace Sector. In: Journal Undergraduate Mathematics and Its Applications 21 (3). S. 257-268.

EEA - European Environment Agency (Hrsg.) (2008): Annual European Community Greenhouse Gas Inventory 1990-2006 and Inventory Report 2008. Ohne Verlagsangabe. Brüssel.

Eichseder, H. und M. Klell (2008): Wasserstoff in der Fahrzeugtechnik - Erzeugung, Speicherung, Anwendung. Vieweg+Teubner. Wiebaden.

Europäische Union (Hrsg.) (1997): EG-Vertrag - Konsolidierte Fassung des Vertrags zur Gründung der Europäischen Gemeinschaft Amt für amtliche Veröffentlichungen der Europäischen Gemeinschaften. Luxemburg.

Europäische Union (Hrsg.) (2003): Richtlinie 2003/96/EG des Rates vom 27. Oktober 2003 zur Restrukturierung der gemeinschaftlichen Rahmenvorschriften zur Besteuerung von Energieerzeugnissen und elektrischem Strom. Brüssel.

European Federation for Transport and Environment (Hrsg.) (2006): Clearing the Air. Ohne Verlagsangabe. Brüssel.

ExxonMobile (Hrsg.) (2008): World Jet Fuel Specifications with Avgas Supplement. Ohne Verlagsangabe. Brüssel.

FAB Europe Central Initiative (Hrsg.) (2008b): Creating the Functional Airspace Block Europe Central - Feasibility Study Report - Version 1.0 (unveröffentlicht)

Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe (Hrsg.) (2006): Biokraftstoffe - eine vergleichende Analyse. Ohne Verlagsangabe. Gülzow.

Farokhi, S. (2008): Aircraft Propulsion. Wiley. Hoboken.

FAZ - Frankfurter Allgemeine Zeitung (Hrsg.) (2008b): Keine Einigung über EU-Luftverkehr-Emissionshandel absehbar. Vom 13.06.2008.

Fichtner, C. , S. Marquart, R. Sausen und D. Lee (2005): The Impact of Cruise Altitude on Contrails and Related Radiative Forcing. In: Meteorologische Zeitschrift 14 (4). S. 563-572.

Fischer, F. und H. Tropsch (1926): Über die direkte Synthese von Erdöl-Kohlenwasserstoffen bei gewöhnlichem Druck. In: Berichte der Deutschen Chemischen Gesellschaft 59 (4), S. 832-836.

Fischer, K. (2008): Fluglinien im Ölpreisschock - Bye, bye, billig. In: Süddeutsche Zeitung vom 23.05.2008.

Fleischer, T. (1998): Weniger Luftverkehr schafft Platz für mehr Luftverkehr? In: TA-Datenbank-Nachrichten 2 (7). S. 96-97.

Fleming, G., A. Malwitz, S. Balasubramanian, C. Roof, F. Grandi, B. Kim, S. Usdrowski, T. Elliff, C. Evers und D. Lee (2007): Trends in Global Noise and Emissions from Commercial Aviation for 2000 through 2025. Veröffentlichung zum 7th USA/Europe Air Traffic Management R&D Seminar. Barcelona.

Flight International (Hrsg.) (2002): Out of Control. Vom 25.06.2002

Focus (Hrsg.) (2008): EU-Rat und EP verständigen sich bei Airline-Emissionshandel. Vom 26.06.2008.

Forster, P. und K. Taylor (2006): Climate Sensitivity and Its Components Diagnosed from Earth Radiation Budget Data. In: Journal of Climate 19 (1). S. 39-52.

Forster, P. und J. Gregory (2006): Climate Forcings and Climate Sensitivities Diagnosed from Coupled Climate Model Integrations. In: Journal of Climate 17 (23). S. 1671-1685.

Frankfurter Rundschau (Hrsg.) (2008): Jets bald führende Klimakiller. Vom 10.04.2008.

Frost & Sullivan (Hrsg.) (2008b): Global Commercial Aviation - Alternative Fuel Market - A Strategic Overview - Executive Summary. (unveröffentlicht).

Gebhardt, H. (Hrsg.) (2007): Geographie - Physische Geographie und Humangeographie. Elsevier. München.

Germanwatch (Hrsg.) (2005): Der internationale Flugverkehr und der Klimawandel. Ohne Verlagsangabe. Bonn.

Germanwatch (Hrsg.) (2008): Globaler Klimawandel - Ursachen, Folgen, Handlungsmöglichkeiten. Ohne Verlagsangabe. Bonn.

GEXSI - Global Exchange for Social Investment (Hrsg.) (2008): Global Market Study on Jatropha - Final Report. Ohne Verlagsangabe. London.

Gillen, D., W. Morrison und C. Stewart (2002): Air Travel Demand Elasticities - Concepts, Issues and Measurement. Department of Finance Canada. Waterloo.

Gmelin, T., G. Hüttig und O. Lehmann (2008): Zusammenfassende Darstellung der Effizienzpotenziale bei Flugzeugen unter besonderer Berücksichtigung der aktuellen Triebwerkstechnik sowie der absehbaren mittelfristigen Entwicklungen - im Auftrag des Bundesministeriums für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit. Ohne Verlagsangabe. Berlin.

Greener by Design (Hrsg.) (2005): Mitigating the Environmental Impact of Aviation - Opportunities and Priorities. Report of the Greener by Design Science and Technology Sub-Group. Ohne Verlagsangabe. London.

Greener by Design (Hrsg.) (2007): Annual Report 2006-2007. Ohne Verlagsangabe. London.

Greenpeace (Hrsg.) (2008): Donner Wetter - Greenpeace Magazin Januar-Februar 2008. Schieweck. Hamburg.

Grewe, V., M. Dameris, C. Fichter und R. Sausen(2002): Impact of Aircraft NOx Emissions - Part 1 - Interactively Coupled Climate-chemistry Simulations and Sensitivities to Climate-chemistry Feedback, Lightning and Model Resolution. In: Meteorologische Zeitschrift 11 (3). S. 177-186.

Grieb, H. (2004): Projektierung von Turboflugtriebwerken. Birkhauser. Basel.

Haggett, P. (2004): Geographie - eine globale Synthese. Ulmer. Stuttgart.

Hahn, B. (2006): Billigfluglinien - eine umweltwissenschaftliche Betrachtung. Wuppertal Institut für Klima, Umwelt, Energie. Wuppertal.

Hamburger Abendblatt (Hrsg.) (2008): Computer & Co - Klimakiller wie die Flugzeuge. Vom 15.02.2008.

Handelsblatt (Hrsg.) (2008b): EU bittet Fluggesellschaften ab 2012 für den Klimaschutz zur Kasse. Vom 27.06.2008.

Harbison, I. (2008): Picking up the Pace. In: GreenSky 7. S. 32-34.

HAW - Hochschule für Angewandte Wissenschaften Hamburg (Hrsg.) (2007): Projekte der Fakultät Technik und Informatik - Katalog 2007/08. Ohne Verlagsangabe. Hamburg.

Hemmer, H., T. Otten, M. Plohr, M. Lecht und A. Döpelheuer (2007): Influence of the Bypass Ratio on Low Altitude Nox Emissions. Beitrag zur 1st CEAS (Council of European Aerospace Societies) European Air and Space Conference. Berlin.

Horstmann, K. (2006): TELFONA - Contribution to Laminar Wing Development for Future Transport Aircraft. Beitrag zu den 5th Community Aeronautical Days 2006. Wien.

ICAO - International Civil Aviation Organization (Hrsg.) (2006a): Convention on International Civil Aviation. Ohne Verlagsangabe. Montreal.

IEA - International Energy Agency (Hrsg.) (2007): CO2 Emissions from Fuel Combustion 1971 - 2005. Ohne Verlagsangabe. Paris.

IPCC - Intergovernmental Panel on Climate Change(Hrsg.) (1999): Aviation and the Global Atmosphere - A Special Report of IPCC Working Groups I and III in Collaboration with the Scientific Assessment Panel to the Montreal Protocol on Substances that Deplete the Ozone Layer. Cambridge University Press. Cambridge.

IPCC - Intergovernmental Panel on Climate Change (Hrsg.) (2000): IPCC Special Report on Emissions Scenarios. Cambridge University Press. Cambridge.

IPCC - Intergovernmental Panel on Climate Change (Hrsg.) (2007a): Zusammenfassung für politische Entscheidungsträger - Klimaänderung 2007 - Wissenschaftliche Grundlagen. Cambridge University Press. Cambridge.

IPCC - Intergovernmental Panel on Climate Change (Hrsg.) (2007b): Climate Change 2007 - Impacts, Adaptation and Vulnerability. Cambridge University Press. Cambridge.

IPCC - Intergovernmental Panel on Climate Change (Hrsg.) (2007c): Climate Change 2007 - Mitigation. Cambridge University Press. Cambridge.

IPCC - Intergovernmental Panel on Climate Change (Hrsg.) (2007d): Climate Change 2007 - The Physical Science Basis. Cambridge University Press. Cambridge.

J.P. Morgan(Hrsg.) (2007): US Food - A Review of Biodiesel Industry Trends. Ohne Verlagsangabe. New York.

Jackson, D., C. Tyler und W. Blake (2007): Computational Analysis of Air-to-Air Refueling. Beitrag zur 25th AIAA (American Institute of Aeronautics and Astronautics) Applied Aerodynamics Conference. Miami.

Janić, M. (2007): The Sustainability of Air Transportation. Ashgate.Burlington.

Jenkinson, L., R Cavcs und D. Rhodes (1995): Automatic Formation Flight - A Preliminary Investigation Into the Application to Civil Operations Beitrag zum 1st Aircraft Engineering, Technology, and Operations Congress. Los Angeles.

Jongschaap, R., W. Corre, P. Bindraban und W. Brandenburg (2007): Claims and Facts on *Jatropha Curas L.* Stichting Het Grone Woundt. Laren.

Jung, D. und M. Lowenberg (2005): Stability and Control Assessment of a Blended-Wing-Body Airliner Configuration. Beitrag zur AIAA (American Institute of Aeronautics and Astronautics) Atmospheric Flight Mechanics Conference and Exhibit. San Francisco.

Kammer, J. (2007): Nationale Wettbewerbsvorteile Brasiliens bei der Produktion von Bioethanol. Diplomarbeit. Ohne Verlagsangabe. Hamburg.

Kercko, B. (2007): Competition Between Agricultural and Renewable Energy Production. In: Quarterly Journal of International Agriculture 46. S. 333-347.

Kloker, M. (2008): Advanced Laminar Flow Control on a Swept Wing – Useful Crossflow Vortices and Suction. Beitrag zur 38th Fluid Dynamics Conference and Exhibit. Seattle.

Klußmann, N. (2007): Lexikon der Luftfahrt. Springer. Berlin.

Koch, C. (2000): Internalisierung externer Kosten im Energie- und Transportsektor. Deutsche Gesellschaft für Technische Zusammenarbeit. Eschborn.

Kraabøl, A., F. Stordal, I. Ford und I. Fløisand (1999): Particles and Heterogeneous Chemistry in Aircraft Plumes. In: Schumann, U. (Hrsg.): Pollution from Aircraft Emissions in the North Atlantic Flight Corridor - POLINAT 2 - Air Pollution Research Report. S. 289-306. Office for Official Publication of the European Communities. Luxemburg.

Krebs, W. (2006): Analyse des Einflusses des Flugverkehrs auf die natürliche Zirrusbewölkung über Europa, Nordafrika und dem Nordatlantik. Dissertation. Ohne Verlagsangabe. München.

Krüger, N. (2003): Greenhouse Gas Emissions from International Aviation and Allocation Options. Miljøstyrelsen. Kopenhagen.

Lachmann, G. (Hrsg.) (1961): Boundary Layer and Flow Control, Its Principles and Application. Pergamon. New York.

Liebeck, R. (2004): Design of the Blended Wing Body Subsonic Transport. In: Journal of Aircraft 41 (1). S. 10-25.

Lueg, B. (2007): Emissionshandel als eines der flexiblen Instrumente des Kyoto-Protokolls - Wirkungsweisen und praktische Ausgestaltung am Beispiel der Europäischen Union. Institut für Weltwirtschaft und Internationales Management der Universität Bremen. Ohne Verlagsangabe.

Mannstein, H. und U. Schumann (2005): Aircraft Induced Contrail Cirrus over Europe. In: Meteorologische Zeitschrift 14 (4). S. 549-554.

Mannstein, H. und U. Schumann (2007): Corrigendum to Mannstein, H., U. Schumann, 2005 - Aircraft Induced Contrail Cirrus over Europe. In: Meteorologische Zeitschrift 16 (1). S. 131-132.

Mannstein, H. und U. Schumann (2008): When Can We Expect the Science to Be Sufficiently Robust to Provide an Acceptable Basis for Regulation? – Contrail / Cirrus. Beitrag zur Greener by Design Conference. London.

Marais, K., S. Lukachko, M. Jun, A. Mahashabde und I. Waitz (2008): Assessing the Impact of Aviation on Climate. In: Meteorologische Zeitschrift 17 (4). S. 157-172.

Marquart, S. (2003): Klimawirkung von Kondensstreifen - Untersuchungen mit einem globalen atmosphärischen Zirkulationsmodell. Dissertation. Ohne Verlagsangabe. Oberpfaffenhofen.

Marquart, S., M. Ponater, L. Ström und K. Gierens (2005): An Upgraded Estimate of the Radiative Forcing of Cryoplane Contrails. In: Meteorologische Zeitschrift 14 (4). S. 573-582.

Mastny, L. (2007): Biofuels for transport - Global Potential and Implications for Energy and Agriculture. Earthscan. London.

Matthes, F., S. Gores, V. Graichen, R. Harthan, P. Markewitz, P. Hansen, M. Kleemann, V. Krey, D. Martinsen, J. Diekmann, M. Horn, H. Ziesing, W. Eichhammer, C. Doll, N. Helfrich, L. Müller, W. Schade und B. Schlomann (2008): Politikszenerarien für den Klimaschutz IV - Szenarien bis 2030. Umweltbundesamt. Dessau-Roßlau.

MBS Ottawa (Hrsg.) (2006): Air Traffic Control Commercialization Policy - Has It Been Effective? McGill. Ontario.

Mensen, H.(2003): Handbuch der Luftfahrt. Springer. Berlin.

Mensen, H. (2007): Planung, Anlage und Betrieb von Flugplätzen. Springer. Berlin.

Minnis, P., J. Ayers, R. Palikonda und D. Phan (2004): Contrails, Cirrus Trends and Climate. In: Journal of Climate 19 (23). S. 6181-6194.

Monner, H., M. Kintscher, B. Nagel, F. Natterer und V. Krajenski (2007): Morphing Wing – Überblick und Trends Beitrag zur Groß Schweißtechnischen Tagung. Basel.

Naeem, M. (2008): Impacts of Low-pressure (LP) Compressors' Fouling of a Turbofan upon Operational-effectiveness of a Military Aircraft. In: Applied Energy 85 (4). S. 243-270.

Nagel, B., H. Monner und E. Breitenbach (2006): Integrated Design of Smart Composites Applied to Smart Winglets. Beitrag zum 25th International Congress of the Aeronautical Sciences. Hamburg.

Nangia, R. (2007): Highly Efficient and Greener Civil Aviation - Step Jump, Why & How. Royal Aeronautical Society. Bristol.

Nangia, R. und M. Palmer (2007): Formation Flying of Commercial Aircraft - Assessment using a New Approach - Wing Span Load and Camber Control. Beitrag zum 45th AIAA (American Institute of Aeronautics and Astronautics) Aerospace Sciences Meeting and Exhibit. Reno.

Noppel, F. und R. Singh (2007): Overview on Contrail and Cirrus Cloud Avoidance Technology. In: Journal of Aircraft 44 (5). S. 1721-1726.

OECD - Organisation for Economic Co-operation and Development (Hrsg.) (1997): Special Issues in Carbon/Energy Taxation - Marine bunker fuel charges. Ohne Verlagsangabe. Paris.

Oil & Gas Journal (Hrsg.) (2007): Oil, Gas Reserves Inch up, Production Steady in 2007. 105 (48) vom 24.12.2007.

Oster, C. und Strong, J. (2007): Managing the Skies. Ashgate. Burlington.

Otten, T., M. Plohr, R. von der Bank (2006): Gegenüberstellung des Emissions-Verbesserungspotentials von Brennkammertechnologien und anderen Weiterentwicklungen am Lufttransportsystem. In: Deutsche Gesellschaft für Luft- und Raumfahrt (Hrsg.) (2006): Deutsche Gesellschaft für Luft- und Raumfahrt Jahrbuch 2006. S. 597-606.

Pache, E. (2005): Möglichkeiten zur Einführung einer Kerosinsteuer auf innerdeutschen Flügen. Umweltbundesamt. Ohne Verlagsangabe. Berlin.

Plohr, M., M. Lecht, T. Otten, A. Döpelheuer und H. Hemmer(2006): Aero-Engine Technology to Cope with ACARE Goals. Beitrag zum 25th International Congress of the Aeronautical Sciences. Hamburg.

Pompl, W. (2007): Luftverkehr - eine ökonomische und politische Einführung. Springer. Berlin.

Ponater, M., V. Grewe, R. Sausen, U. Schumann, S. Pechtl, E. Highwood und N. Stuber (2006): Climate Sensitivity of Radiative Impacts from Transport Systems. In: Proceedings of the Transportation, Atmosphere and Climate - Conference. S. 1990-220. Oxford.

PRC - Performance Review Commission (Hrsg.) (2008a): Evaluation of Functional Airspace Block (FAB) Initiatives and their Contribution to Performance Improvement - Interim Report. Ohne Verlagsangabe. Brüssel.

PRC - Performance Review Commission (Hrsg.) (2008b): Performance Review Report - An Assessment of Air Traffic Management in Europe during the Calendar Year 2007. Ohne Verlagsangabe. Brüssel.

PRC - Performance Review Commission (Hrsg.) (2008c): Performance Review Report - An Assessment of Air Traffic Management in Europe during the Calendar Year 2007. Draft Final Report. (unveröffentlicht).

Qina, N. , A. Vavalleb, A. Le Moignea, M. Labanc, K. Hackettb und P. Weinerfeltd (2004): Aerodynamic Considerations of Blended Wing Body Aircraft. In: Progress in Aerospace Sciences 40 (6). S. 321-343 .

Rädel, G. und K. Shine (2008): Radiative Forcing by Persistent Contrails and Its Dependence on Cruise Altitudes. In: Journal of Geophysical Research 113.

Rahmstorf, S. und H. Schellnhuber (2007): Der Klimawandel. Beck. München.

Reneaux, J. (2004): Overview on Drag Reduction Technologies for Civil Transport Aircraft. Beitrag zum European Congress on Computational Methods in Applied Sciences and Engineering. Jyväskylä.

Resource Analysis (Hrsg.) (1999): Analysis of the Taxation of Aircraft Fuel. Ohne Verlagsangabe. Delft.

Robin Wood (Hrsg.) (2005): Der Traum vom Fliegen. Für ganze 20 Euro. Ohne Verlagsangabe. Berlin.

Rossow, C. (2007): ACARE Goals and DLR-Contributions for Reduction of Aviation Climate Impact. Beitrag zur 1st CEAS (Council of European Aerospace Societies) European Air and Space Conference. Berlin.

Rupp, O. (2001): Instandhaltungskosten bei zivilen Strahltriebwerken. Beitrag zum Deutschen Luft- und Raumfahrtkongress. Hamburg.

SANE - Sustainable Aviation Network Europe (Hrsg.) (2008): Conference Information Guide - Sustainable Aviation: Sound and Climate in Perspective. (unveröffentlicht).

Sausen, R. (2007a): Auswirkungen des globalen Luftverkehrs auf die Klimaentwicklung - eine Einschätzung. Beitrag zum Berliner Forum Zukunft. Berlin.

Sausen, R. (2007b): Wissenschaftliche Grundlagen für einen möglichen Emissionshandel im Luftverkehr. Beitrag zur 61. Tagung der Arbeitsgemeinschaft Deutscher Fluglärmkommissionen Frankfurt.

Sausen, R. und U. Schumann (2000): Estimates of the Climate Response to Aircraft CO<sub>2</sub> and NO<sub>x</sub> Emissions Scenarios. In: Climatic Change 44. S. 27-58.

Sausen, R., I. Isaksen, V. Grewe, D. Hauglustaine, D. Lee, G. Myhre, M. Köhler, G. Pitari, U. Schumann, F. Stordal und C. Zerefos (2005): Aviation Radiative Forcing in 2000 - An Update on IPCC (1999). In: Meteorologische Zeitschrift 14 (4) S. 555-561.

Sawyers, D. und R. Wilson (1996): Assessment of the Impact of Hybrid Laminar Flow on a Large Subsonic Aircraft. Beitrag zum 2nd European Forum on Laminar Flow Technology. Bordeaux.

Schallaböck, K. (2008): Luftverkehrsstudie 2007 - Im Steigflug in die Klimakatastrophe? Ohne Verlagsangabe. Wuppertal.



Scheelhaase, J. und W. Grimme (2007): Emissionshandel im internationalen Luftverkehr - Eine empirische Analyse der ökonomischen Effekte auf ausgewählte Fluggesellschaften. In: Zeitschrift für angewandte Umweltforschung 18 (1). S. 97-112.

Scheelhaase, J., W. Grimme und M. Schäfer (2007): How Does the Latest EU Proposal on Aviation and Climate Change Affect Competition Between European and US-airlines? Beitrag zur 11th Air Transport Research Society Conference. Berkeley.

Schellnhuber, H. (Hrsg.) (2006): Avoiding Dangerous Climate Change - International Symposium on Stabilisation of Greenhouse Gas Concentrations. Cambridge University Press. Cambridge.

Schieritz, M. (2005): EU prescht bei Kerosinsteuer vor. In: Financial Times Deutschland vom 7.2.2005.

Schlager, H., R. Sausen und U. Schumann (2007): IPCC Emissions Scenarios - Importance for Assessing Aviation Contributions to Climate Change. Beitrag zum ICAO Colloquium on Aviation Emissions. Montreal.

Schmitz, N. (Hrsg.) (2003): Bioethanol in Deutschland. Landwirtschaftsverlag. Münster.

Schönwiese, C. (2003): Klimatologie. Ulmer. Stuttgart.

Schrauf, G. (2006): Key Aerodynamic Technologies for Aircraft Performance Improvement. Beitrag zu den 5th Community Aeronautical Days 2006. Wien.

Schubert, C. (2008): Flugausstellung ILA - Dollarkurs und Ölpreis werfen Schatten. In: Frankfurter Allgemeine Zeitung vom 28.05.2008. Frankfurt.

Schumann, U. (1996): On Conditions for Contrail Formation from Aircraft Exhaust. In: Meteorologische Zeitschrift 5. S. 4-23.

Schumann, U. (2007a): Klimawirkung des Luftverkehrs. Beitrag zum Forum der Luftfahrt am 27.09.2007. Luzern.

Schumann, U. (2007b): Klimawirkung des Luftverkehrs. Beitrag zum Fachgespräch Luftverkehr und Klimaschutz. Berlin.

Schumann, U. (2008): Luftverkehr und Klima. In: Physik in unserer Zeit 39 (6). S. 143-149.

Schumann, U., R. Sausen und V. Gollnick (2007): Klimawirkungen des Luftverkehrs. In: Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt (Hrsg.): Klimawirkungen des Luftverkehrs. S. 6-11. Ohne Verlagsangabe. Köln.

Scott, C., T. Onasch, B. Frank, L. Marr, J. Jayne, M. Canagaratna, J. Grygas, T. Lanni, B. Anderson, D. Worsnop und R. Miake-Lye (2005): Particulate Emissions from in-use Commercial Aircraft. In: Aerosol Science and Technology 39. S. 799-809.

- Seinfeld, J. und S. Pandis (2006): Atmospheric Chemistry and Physics. Wiley. Hoboken.
- SESAR Consortium (Hrsg.) (2006a): Air Transport Framework - The Current Situation. Ohne Verlagsangabe. Brüssel.
- SESAR Consortium (Hrsg.) (2006b): Air Transport Framework - The Performance Target. Ohne Verlagsangabe. Brüssel.
- SESAR Consortium (Hrsg.) (2007): The ATM Target Concept. Ohne Verlagsangabe. Brüssel.
- SESAR Consortium (Hrsg.) (2008b): SESAR Master Plan. Ohne Verlagsangabe. Brüssel.
- SESAR Consortium (Hrsg.) (2008c): ATM Deployment Sequence. Ohne Verlagsangabe. Brüssel.
- Shafiee, S. und E. Topal (2008): An Econometrics View of Worldwide Fossil Fuel Consumption and the Role of US. In: Energy Policy 36 (2). S. 775-786.
- Sittig, F. (2008): Politisch korrektes Fliegen. In: Die Welt vom 13.4.2008.
- Smith, R. (1998): Seventy-Five Years of Inflight Refueling. Ohne Verlagsangabe. Washington.
- Stern, N. (2007): The Economics of Climate Change - The Stern Review. Cambridge University Press. Cambridge.
- Stuber, N., M. Ponater und R. Sausen (2005): Why Radiative Forcing Might Fail as a Predictor of Climate Change. In: Climate Dynamics 24 (5). S. 497-510.
- Svensson, F., Hasselrot, A. und J. Moldanova (2004): Reduced Environmental Impact by Lowered Cruise Altitude for Liquid Hydrogen-fuelled Aircraft. In: Aerospace Science and Technology 8 (4). S. 307-320.
- SZ - Süddeutsche Zeitung (Hrsg.) (2008): Deutscher Streit blockiert Klimaplan. Vom 27.05.2008.
- Szodruch, J., W. Grimme und E. Stumpf (2007): Lufttransport der Zukunft. Beitrag zum Technologieforum der Luft- und Raumfahrt. Berlin.
- TAZ - Tageszeitung (Hrsg.) (2007): Himmelweiter Wahnsinn. Vom 06.03.2007.
- TAZ - Tageszeitung (Hrsg.) (2008a): Verkehrsexperte fordert Kerosinsteuer. Vom 14.04.2008.
- TAZ - Tageszeitung (Hrsg.) (2008b): Airlines sollen fürs Klima zahlen. Vom 28.06.2008.
- Tol, R. (2007): The Impact of a Carbon Tax on International Tourism. Elsevier. Dublin.

Ungefug, H. (1998): Luftverkehrsanalyse 1998 - Umstieg vom Flug zum Zug. Ohne Verlagsangabe. Berlin.

Van Houtte, B. (2007): The Single European Sky - EU Reform of ATM. In: Cook, A. (Hrsg.) (2007): European Air Traffic Management. S. 181-198. Ashgate. Burlington.

Vlek, S. und M. Vogels (2000): AERO - Aviation Emissions and Evaluation of Reduction Options. Elsevier. Amsterdam.

Wit, R., J. Dings, P. de Leon, L. Thweites, P. Peeters, D. Greenwood und R. Doganis. (2002): Economic Insensitives to Mitigate Greenhouse Gas Emissions from Air Transport in Europe. CE. Delft.

World Bank (Hrsg.) (2007): World Development Report 2008 - Agriculture for Development. Ohne Verlagsangabe. Washington.

Wüst, C. (2008): Nachtsprung auf Schienen. In: Der Spiegel vom 11.02.2008. S. 135.

## **Internet- und elektronische Quellen**

Auf alle Internetseiten wurde zuletzt am 03.12.2008 zugegriffen.

ACARE - Advisory Council For Aeronautics Research in Europe (Hrsg.) (2002a): Strategic Research Agenda Volume 1.

<http://www.acare4europe.org/docs/es-volume1-2/volume1.pdf>

ACARE - Advisory Council For Aeronautics Research in Europe (Hrsg.) (2002b): The Challenge of the Environment.

<http://www.acare4europe.org/docs/es-volume1-2/volume2-03-environment.pdf>

ACARE - Advisory Council For Aeronautics Research in Europe (Hrsg.) (2008): Membership.

<http://www.acare4europe.com/html/tor.asp#members>

ACI - Airport Council International (Hrsg.) (2006): ACI Opposes French Proposal for New Tax on Aviation. Medienmitteilung vom 03.06.2006.

[http://www.airports.org/cda/aci\\_common/display/main/aci\\_content07\\_c.jsp?zn=aci&c p=1-7-46^6682\\_666\\_2\\_\\_](http://www.airports.org/cda/aci_common/display/main/aci_content07_c.jsp?zn=aci&c p=1-7-46^6682_666_2__)

ACI - Airport Council International (Hrsg.) (2008): New Single European Sky Package Finally Paves the Way for Alignment of ATM and Airport Capacity Objectives. Medienmitteilung vom 25.06.2008.

[http://www.aci-europe.org/upload/08\\_07\\_25%20European%20airports%20welcome%20launch%20of%20SES2.pdf](http://www.aci-europe.org/upload/08_07_25%20European%20airports%20welcome%20launch%20of%20SES2.pdf)

ADV - Arbeitsgemeinschaft Deutscher Verkehrsflughäfen (Hrsg.) (2007): Klimawirkungen des Luftverkehrs - Argumente und Fakten.  
[www.adv.aero/download/presse/Faktenpapier\\_Luftverkehr\\_und\\_Klima\\_-\\_neu\\_-.pdf](http://www.adv.aero/download/presse/Faktenpapier_Luftverkehr_und_Klima_-_neu_-.pdf)

Aero (Hrsg.) (2008a): Airbus deutet Einführung des GTF im A320-Programm an. Medienmitteilung vom 21.07.2008.  
[http://www.aero.de/Airbus\\_deutet\\_Einfuehrung\\_des\\_GTF\\_im\\_A320-Programm\\_an\\_6883.htm](http://www.aero.de/Airbus_deutet_Einfuehrung_des_GTF_im_A320-Programm_an_6883.htm)

Aero (Hrsg.) (2008b): Luftfahrt leidet unter Ölpreis und Fluggastenschwund. Vom 11.06.2008.  
[http://www.aero.de/Luftfahrt\\_leidet\\_unter\\_Oelpreis\\_und\\_Fluggastenschwund\\_\\_6637.htm](http://www.aero.de/Luftfahrt_leidet_unter_Oelpreis_und_Fluggastenschwund__6637.htm)

Aerospaceweb (Hrsg.) (2008): Turboprops and Jet Engines.  
<http://www.aerospaceweb.org/question/propulsion/q0135b.shtml>

Air New Zealand (Hrsg.) (2008): Air New Zealand setzt auf umweltfreundlichen Biotreibstoff. Medienmitteilung vom 12.06.2008.  
[http://www.airnewzealand.de/about\\_us/mediacentre/pressreleases/airnz-environmentally-sustainable-fuel-aspirations-jun08.htm](http://www.airnewzealand.de/about_us/mediacentre/pressreleases/airnz-environmentally-sustainable-fuel-aspirations-jun08.htm)

Airbus (Hrsg.) (2007b): Airbus liefert erste A380 an Singapore Airlines aus - Neues Kapitel in der Geschichte der Luftfahrt. Medienmitteilung vom 15.10.2007.  
[http://www.airbus.com/en/presscentre/pressreleases/pressreleases\\_items/07\\_10\\_15\\_a380\\_singapore\\_delivery\\_DE.html](http://www.airbus.com/en/presscentre/pressreleases/pressreleases_items/07_10_15_a380_singapore_delivery_DE.html)

Airbus (Hrsg.) (2008a): Airbus Completes First Test Flight with Alternative Fuel on Civil Aircraft. Medienmitteilung vom 01.02.2008.  
[http://www.airbus.com/en/presscentre/pressreleases/pressreleases\\_items/08\\_02\\_01\\_alternative\\_fuel\\_test\\_completion.html](http://www.airbus.com/en/presscentre/pressreleases/pressreleases_items/08_02_01_alternative_fuel_test_completion.html)

Airbus (Hrsg.) (2008b): A350 XWB.  
<http://www.airbus.com/en/aircraftfamilies/a350/efficiency/index.html>

Airbus (Hrsg.) (2008c): Airbus A380 - See the Bigger Picture.  
<http://www.airbus.com/en/aircraftfamilies/a380/index2.html>

Airbus Deutschland (Hrsg.) (2003): Liquid Hydrogen Fuelled Aircraft - System Analysis - Final Technical Report.  
[www.aero-net.org/pdf-docs/20040202-final-technical-report-4-pv.pdf](http://www.aero-net.org/pdf-docs/20040202-final-technical-report-4-pv.pdf)

Airliners (Hrsg.) (2008): Emirates veröffentlicht Einsatzplan für Airbus A380. Vom 03.03.2008.  
<http://www.airliners.de/news/artikelseite.php?articleid=14427>

Anderson. D. (2006): Costs and Finance of Abating Carbon Emissions in the Energy Sector.  
[http://www.hm-treasury.gov.uk/media/2/D/stern\\_review\\_supporting\\_technical\\_material\\_dennis\\_anderson\\_231006.pdf](http://www.hm-treasury.gov.uk/media/2/D/stern_review_supporting_technical_material_dennis_anderson_231006.pdf)

Arps, H., A. Hermann, W. Zimmer, W. Krebs, S. Donnerhack, F. Kennepohl und H. Kuhfeld (2006): Verschärfung der Lärmgrenzwerte von zivilen Strahlflugzeugen unter besonderer Berücksichtigung des Zusammenhangs zwischen den Lärm- und Schadstoffemissionen von Strahltriebwerken.

<http://www.umweltdaten.de/publikationen/fpdf-l/3186.pdf>

ATA - Air Transport Association (Hrsg.) (2008): US Aviation Excise Taxes and Fees.

<http://www.airlines.org/economics/taxes/excisetaxes.htm>

ATAG - Air Transport Action Group (Hrsg.) (2008b): Fuel Consumption & Alternative Fuels.

<http://www.atag.org/content/showissue.asp?level1=3&level2=472&folderid=472&pageid=1084>

Atmosfair (Hrsg.) (2008): Der Emissionsrechner.

[https://www.atmosfair.de/fileadmin/user\\_upload/Medienecke/Downloadmaterial/Rund\\_um\\_atmosfair/Documentation\\_Calculator\\_DE\\_2008.pdf](https://www.atmosfair.de/fileadmin/user_upload/Medienecke/Downloadmaterial/Rund_um_atmosfair/Documentation_Calculator_DE_2008.pdf)

Aviation Week (Hrsg.) (2007): Airline Groups Slam Proposed Dutch Tax. Medienmitteilung vom 05.11.2002.

[http://www.aviationweek.com/aw/generic/story\\_generic.jsp?channel=aviationdaily&id=news/DUTC10167.xml&headline=Airline%20Groups%20Slam%20Proposed%20Dutch%20Tax](http://www.aviationweek.com/aw/generic/story_generic.jsp?channel=aviationdaily&id=news/DUTC10167.xml&headline=Airline%20Groups%20Slam%20Proposed%20Dutch%20Tax)

Aviation Week (Hrsg.) (2008): Lufthansa Technik in Engine Washing Business. Medienmitteilung vom 20.02.2008.

[http://www.aviationweek.com/aw/generic/story\\_generic.jsp?channel=comm&id=news/WASH02208.xml&headline=Lufthansa%20Technik%20In%20Engine%20Washing%20Business](http://www.aviationweek.com/aw/generic/story_generic.jsp?channel=comm&id=news/WASH02208.xml&headline=Lufthansa%20Technik%20In%20Engine%20Washing%20Business)

Aviationwatch (Hrsg.) (2007): Notes of European Aviation Campaigners' Conference - 26th March 2007 Held in Brussels.

[www.aef.org.uk/downloads/BrusselsEventMarch2007.doc](http://www.aef.org.uk/downloads/BrusselsEventMarch2007.doc)

Aviationwatch (Hrsg.) (2008): Alternative Aviation Fuels - Green and Lean. Vom 20.06.2008.

<http://aviationwatch.eu/?p=362>

BARIG - Board of Airline Representatives in Germany (Hrsg.) (2002): Zusätzliche Steuern belasten den Luftverkehr in Deutschland. Medienmitteilung vom 02.06.2008.

[http://www.barig.org/scripts/clsAIWeb.php?news\\_id=52](http://www.barig.org/scripts/clsAIWeb.php?news_id=52)

Bauer, J. (2008): NASA Dryden Flight Research Center.

[http://www.uasresearch.org/UserFiles/File/055\\_Contributing-Stakeholder\\_NASA-DFRC.pdf](http://www.uasresearch.org/UserFiles/File/055_Contributing-Stakeholder_NASA-DFRC.pdf)

BBC - British Broadcasting Corporation (Hrsg.) (2005): First Hydrogen Plane Tested in US.

<http://news.bbc.co.uk/2/hi/americas/4643575.stm>

Behörde für Wirtschaft und Arbeit Hamburg (Hrsg.) (2008): 40 Millionen für Hamburger Luftfahrtcluster. Medienmitteilung vom 02.09.2008.

<http://www.hamburg.de/pressearchiv-fhh/486720/02-09-08-bwa-lufffahrtcluster.html>

Bernhardt, D. (2006): Ökobilanz von Bioethanol.  
<http://www.germanwatch.org/handel/eth06.htm>

Biofuels Research Advisory Council (Hrsg.) (2006): Biofuels in the European Union.  
[http://ec.europa.eu/research/energy/pdf/draft\\_vision\\_report\\_en.pdf](http://ec.europa.eu/research/energy/pdf/draft_vision_report_en.pdf)

BMU - Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit. (Hrsg.) (2008): Einigung in Brüssel: Flugverkehr wird ab 2012 in den EU-Emissionshandel einbezogen. Medienmitteilung vom 08.06.2008.  
[http://www.bmu.de/pressemitteilungen/aktuelle\\_pressemitteilungen/pm/41903.php](http://www.bmu.de/pressemitteilungen/aktuelle_pressemitteilungen/pm/41903.php)

BMVBS - Bundesministerium für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung (Hrsg.) (2008): Tiefensee: Mitgliedstaaten einigen sich auf Einbeziehung des Luftverkehrs in den Emissionshandel. Medienmitteilung vom 26.06.2008.  
<http://www.bmvbs.de/EU-Ratspraesidentschaft-,2618.998485/Tiefensee-Mitgliedstaaten-eini.htm>

Boeing (Hrsg.) (2007): Boeing Flies Blended Wing Body Research Aircraft. Medienmitteilung vom 26.07.2007.  
[http://www.boeing.com/phantom/news/2007/q3/070726c\\_nr.html](http://www.boeing.com/phantom/news/2007/q3/070726c_nr.html)

Boeing (Hrsg.) (2008b): Boeing Joins Aviation, Energy and Academic Leaders to Accelerate Development and Availability of Sustainable Biofuels. Medienmitteilung vom 17.04.2008.  
[http://www.boeing.com/news/releases/2008/q3/080924e\\_nr.html](http://www.boeing.com/news/releases/2008/q3/080924e_nr.html)

Boeing (Hrsg.) (2008c): Orders and Deliveries.  
<http://active.boeing.com/commercial/orders/index.cfm>

Boeing (Hrsg.) (2008d): Boeing Revises 787 First Flight and Delivery Plans. Medienmitteilung vom 09.04.2008  
[http://www.boeing.com/news/releases/2008/q2/080409b\\_nr.html](http://www.boeing.com/news/releases/2008/q2/080409b_nr.html)

Bombardier (Hrsg.) (2008): Bombardier Launches C Series Aircraft Program. Medienmitteilung vom 13.07.2008.  
<http://www.bombardier.com/en/aerospace/media-centre/press-releases/details?docID=0901260d800326db>

BUND - Bund für Umwelt und Naturschutz Deutschland (Hrsg.) (2007): Für Steuergerechtigkeit über den Wolken.  
[www.bund.net/fileadmin/bundnet/publikationen/verkehr/20040823\\_verkehr\\_kerosinst\\_euer\\_hintergrund.pdf](http://www.bund.net/fileadmin/bundnet/publikationen/verkehr/20040823_verkehr_kerosinst_euer_hintergrund.pdf)

BUND - Bund für Umwelt und Naturschutz Deutschland (Hrsg.) (2008): Klimakiller Luftverkehr.  
[http://www.bund.net/bundnet/themen\\_und\\_projekte/verkehr/luftverkehr/](http://www.bund.net/bundnet/themen_und_projekte/verkehr/luftverkehr/)

CAA - Civil Administration Authority (Hrsg.) (2008): Taxes, Fees and Charges Added to Air Fares.

<http://www.caa.co.uk/default.aspx?catid=589&pagetype=90&pageid=2449>

CANSO - Civil Air Navigation Service Organisation (Hrsg.) (2004): CANSO Calls for Redefinition of Eurocontrol Role. Medienmitteilung vom 25.10.2004.

<http://www.canso.org/Canso/Web/news/CANSO+press+releases/archive.htm>

CANSO - Civil Air Navigation Service Organisation (Hrsg.) (2008): CANSO European ANSPs welcome SES Package 2 Medienmitteilung vom 27.06.2008.

<http://www.canso.org/Canso/Web/news/CANSO+press+releases/CANSO+European+ANSPs+welcome+SES+Package+2.htm>

CFM (Hrsg.) (1998): CFM'S Advanced Double Annular Combustor Technology. Vom 09.07.1998.

<http://www.cfm56.com/press/news/cfms+advanced+double+annular+combustor+technology/198>

Choren Industries (Hrsg.) (2008): Bundeskanzlerin und sächsischer Ministerpräsident besuchen Choren. Medienmitteilung vom 08.05.2008.

[http://www.choren.com/de/choren\\_industries/informationen\\_presse/pressemitteilungen/?nid=184](http://www.choren.com/de/choren_industries/informationen_presse/pressemitteilungen/?nid=184)

Clean Sky (Hrsg.) (2008a): Sustainable and Green Engines.

[http://www.cleansky.eu/index.php?arbo\\_id=71&set\\_language=en](http://www.cleansky.eu/index.php?arbo_id=71&set_language=en)

Clean Sky (Hrsg.) (2008b): What is the Clean Sky JTI?

[http://www.cleansky.eu/index.php?arbo\\_id=35](http://www.cleansky.eu/index.php?arbo_id=35)

Cléaz-Savoyen, R. (2004): Formation Flight - A Possible Approach to Commercial and Military Cargo Transport.

[http://ocw.mit.edu/NR/rdonlyres/Aeronautics-and-Astronautics/16-886Spring2004/E5956A3B-9FF0-4849-A8E7-C0EBECCDABD1/0/CleazSavoyen\\_rev.pdf](http://ocw.mit.edu/NR/rdonlyres/Aeronautics-and-Astronautics/16-886Spring2004/E5956A3B-9FF0-4849-A8E7-C0EBECCDABD1/0/CleazSavoyen_rev.pdf)

Continental Airlines (Hrsg.) (2008): Continental Airlines, Boeing and GE Aviation Announce Plans for Sustainable Biofuels Flight Demonstration. Medienmitteilung vom 13.03.2008.

<https://www.continental.com/web/de-DE/apps/vendors/default.aspx?SID=C414EB610F4C4F499427D8BAAB092A09&i=PRNEWS>

CORDIS - Community Research and Development Information Service (Hrsg.) (2003): Hybrid Laminar Flow Technology.

[http://cordis.europa.eu/data/PROJ\\_BRITE/ACTIONeqDndSESSIONeq22298200595ndDOCEq32ndTBLeqEN\\_PROJ.htm](http://cordis.europa.eu/data/PROJ_BRITE/ACTIONeqDndSESSIONeq22298200595ndDOCEq32ndTBLeqEN_PROJ.htm)

CORDIS - Community Research and Development Information Service (Hrsg.) (2005): Aircraft Emissions - Contribution of Different Climate Components to Changes in Radiative Forcing-tradeoff to Reduce Atmospheric Impact.

[http://cordis.europa.eu/data/PROJ\\_FP5/ACTIONeqDndSESSIONeq112362005919ndDOCEq116ndTBLeqEN\\_PROJ.htm](http://cordis.europa.eu/data/PROJ_FP5/ACTIONeqDndSESSIONeq112362005919ndDOCEq116ndTBLeqEN_PROJ.htm)

CORDIS - Community Research and Development Information Service (Hrsg.) (2007): European Program for Transition Prediction.

[http://cordis.europa.eu/fetch?CALLER=FP6\\_PROJ\\_BRITE&ACTION=D&DOC=4&CAT=PROJ&QUERY=1204706164583&RCN=30965](http://cordis.europa.eu/fetch?CALLER=FP6_PROJ_BRITE&ACTION=D&DOC=4&CAT=PROJ&QUERY=1204706164583&RCN=30965)

Der Spiegel (Hrsg.) (2008a): Branson fliegt auf Biosprit. Vom 23.02.2008.

<http://www.spiegel.de/reise/aktuell/0,1518,537388,00.html>

Der Spiegel (Hrsg.) (2008b): Sparmassnahme - Belgische Airline fliegt langsamer. Vom 13.04.2008.

<http://www.spiegel.de/reise/europa/0,1518,549193,00.html>

Der Spiegel (Hrsg.) (2008c): Brüssel blamiert sich mit CO2-Kompromiss. Vom 02.12.2008.

<http://www.spiegel.de/auto/aktuell/0,1518,593989,00.html>

Deutsche Lufthansa (Hrsg.) (2008e): Charts zum Ergebnis Januar-März 2008.

[http://www.lufthansa-financials.de/servlet/PB/show/1026056/VF%20Q12008%20Charts\\_deutsch.pdf](http://www.lufthansa-financials.de/servlet/PB/show/1026056/VF%20Q12008%20Charts_deutsch.pdf)

Deutscher Bundestag (Hrsg.) (2006): Verabschiedetes Gesetz tritt nicht in Kraft.

<http://www.bundestag.de/aktuell/archiv/2006/flug/index.html>

Deutscher Bundestag (Hrsg.) (2007): Antrag der Fraktion Bündnis 90/Die Grünen - Klimaschutzmaßnahmen im Luftverkehr ergreifen. Vom 04.07.2007.

<http://dip21.bundestag.de/dip21/btd/16/059/1605967.pdf>

Deutscher Bundestag (Hrsg.) (2008): Bundestag beriet über Klimaschutz. Medienmitteilung vom 02.06.2008.

[http://www.bundestag.de/aktuell/archiv/2008/20557355\\_kw22\\_freitag/index.html](http://www.bundestag.de/aktuell/archiv/2008/20557355_kw22_freitag/index.html)

DFS - Deutsche Flugsicherung (Hrsg.) (2008): Standorte.

<http://www.dfs.de/dfs/internet/deutsch/index.html>

DGLR - Deutsche Gesellschaft für Luft- und Raumfahrt (Hrsg.) (2008): Luftatmende Triebwerke.

[http://www.t3.dglr.de/t31\\_luftatmende\\_triebwerte/index.html](http://www.t3.dglr.de/t31_luftatmende_triebwerte/index.html)

Die Welt (Hrsg.) (2008a): Airlines sparen - und machen das Fliegen teurer. Vom 04.07.2008.

[http://www.welt.de/reise/article2174677/Airlines\\_sparen\\_\\_und\\_machen\\_das\\_Fliegen\\_teurer.html](http://www.welt.de/reise/article2174677/Airlines_sparen__und_machen_das_Fliegen_teurer.html)

Die Welt (Hrsg.) (2008b): Sparkurs - Bei Fluggesellschaften zählt jetzt jedes Kilo. Vom 13.06.2008.

[http://www.welt.de/wirtschaft/article2098156/Bei\\_Fluggesellschaften\\_zaehlt\\_jetzt\\_jedes\\_Kilo.html](http://www.welt.de/wirtschaft/article2098156/Bei_Fluggesellschaften_zaehlt_jetzt_jedes_Kilo.html)



Die Welt (Hrsg.) (2008c): EU zwingt Airlines zum Klimaschutz. Vom 08.07.2008.  
[http://www.welt.de/wirtschaft/article2191300/EU\\_zwingt\\_Airlines\\_zum\\_Klimaschutz.html](http://www.welt.de/wirtschaft/article2191300/EU_zwingt_Airlines_zum_Klimaschutz.html)

Die Zeit (Hrsg.) (2007): Nur ein Feigenblatt? Vom 05.04.2008.  
<http://www.zeit.de/online/2007/15/Klimaabgabe-Kommentar>

Die Zeit (Hrsg.) (2008a): Kaukasus-Krieg - Russland rückt nach Georgien vor. Vom 12.08.2008.  
<http://www.zeit.de/online/2008/33/georgien-kaempfe>

DLR - Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt (Hrsg.) (2007): Erfolgreicher Erstflug des HyFish - ein Brennstoffzellen-Flugmodell geht in die Luft. Medienmitteilung vom 03.04.2007.  
[http://www.dlr.de/desktopdefault.aspx/tabid-13/135\\_read-8329/](http://www.dlr.de/desktopdefault.aspx/tabid-13/135_read-8329/)

DLR - Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt (Hrsg.) (2008a): Luftfahrt und Umwelt - analysieren und optimieren.  
[http://www.dlr.de/100Jahre/DesktopDefault.aspx/tabid-2565/4432\\_read-10971/](http://www.dlr.de/100Jahre/DesktopDefault.aspx/tabid-2565/4432_read-10971/)

DLR - Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt und ADV - Arbeitsgemeinschaft Deutscher Verkehrsflughäfen (Hrsg.) (2008): Der aktuelle Low Cost Carrier Markt in Deutschland.  
[www.dlr.de/PortalData/1/Resources/portal\\_news/newsarchiv2007/lcc\\_2\\_2007.pdf](http://www.dlr.de/PortalData/1/Resources/portal_news/newsarchiv2007/lcc_2_2007.pdf) -

EADS - European Aeronautic Defence and Space Company. (Hrsg.) (2008): Airbus A380.  
<http://www.eads.net/1024/de/madebyeads/protection/a380/a380.html>

Easyjet (Hrsg.) (2007): Easyjet und die Umwelt.  
[http://www.easyjet.com/common/img/DE\\_CSR.pdf](http://www.easyjet.com/common/img/DE_CSR.pdf)

EIA - Energy Information Administration (Hrsg.) (2007): Biofuels in the US Transportation Sector.  
<http://www.eia.doe.gov/oiaf/analysispaper/biomass.html>

ESRI - Environmental Systems Research Institute (Hrsg.) (2002): Data & Maps. (CD-ROM). Redlands.

Eurocontrol (Hrsg.) (2006): The Single European Sky.  
[http://www.eurocontrol.int/ses/public/standard\\_page/sk\\_ses.html](http://www.eurocontrol.int/ses/public/standard_page/sk_ses.html)

Eurocontrol (Hrsg.) (2008a): Flights in Europe Surge to All-time High in 2007 and Forecast to Grow Steadily in 2008. Medienmitteilung vom 18.09.2007.  
[http://www.eurocontrol.int/corporate/gallery/content/public/docs/pdf/pressreleases/2008/080114\\_Figures\\_final.pdf](http://www.eurocontrol.int/corporate/gallery/content/public/docs/pdf/pressreleases/2008/080114_Figures_final.pdf)

Eurocontrol (Hrsg.) (2008b): Frequently Asked Questions.  
[http://www.eurocontrol.int/corporate/public/faq/about\\_us\\_faq](http://www.eurocontrol.int/corporate/public/faq/about_us_faq)

Eurocontrol (Hrsg.) (2008c): Central Route Charges Office.

[http://www.eurocontrol.int/crco/public/subsite\\_homepage/homepage.html](http://www.eurocontrol.int/crco/public/subsite_homepage/homepage.html)

Eurocontrol (Hrsg.) (2008d): The Eurocontrol Contracting Parties.

[http://www.eurocontrol.int/corporate/public/standard\\_page/org\\_membership.html](http://www.eurocontrol.int/corporate/public/standard_page/org_membership.html)

Europäische Kommission (Hrsg.) (1999): Mitteilung der Kommission an den Rat und das Europäische Parlament (KOM (1999) 614 endgültig) - Die Schaffung eines einheitlichen europäischen Luftraums. Vom 01.12.1997.

<http://eur-lex.europa.eu/LexUriServ/LexUriServ.do?uri=COM:1999:0614:FIN:DE:PDF>

Europäische Kommission (Hrsg.) (2005): Verringerung der Klimaauswirkungen des Luftverkehrs. Vom 27.09.2005.

<http://eur-lex.europa.eu/LexUriServ/LexUriServ.do?uri=COM:2005:0459:FIN:DE:PDF>

Europäische Kommission (Hrsg.) (2006a): Richtlinie des Europäischen Parlaments und des Rates zur Änderung der Richtlinie 2003/87/EG zwecks Einbeziehung des Luftverkehrs in das System für den Handel mit Treibhausgasemissionszertifikaten in der Gemeinschaft. Vom 20.12.2006.

<http://eur-lex.europa.eu/LexUriServ/LexUriServ.do?uri=COM:2006:0818:FIN:DE:PDF>

Europäische Kommission (Hrsg.) (2006b): Zusammenfassung der Folgenabschätzung: Einbeziehung des Luftverkehrs in das EU-Handelssystem für Treibhausgasemissionsrechte (EU-ETS). Vom 20.12.2006.

[http://ec.europa.eu/environment/climat/pdf/aviation/sec\\_2006\\_1685\\_de.pdf](http://ec.europa.eu/environment/climat/pdf/aviation/sec_2006_1685_de.pdf)

Europäische Kommission (Hrsg.) (2007a): Kommission fördert neue Reihe von Forschungsprojekten für eine umweltfreundlichere und wettbewerbsfähigere Luftfahrt. Medienmitteilung vom 18.10.2007.

<http://europa.eu/rapid/pressReleasesAction.do?reference=IP/07/1549&format=HTML&aged=1&language=DE&guiLanguage=en>

Europäische Kommission (Hrsg.) (2007b): Mitteilung der Kommission an den Rat und das Europäische Parlament (KOM (2006) 845 endgültig) - Fortschrittsbericht Biokraftstoffe. Vom 10.01.2007.

<http://eur-lex.europa.eu/LexUriServ/LexUriServ.do?uri=COM:2006:0845:FIN:DE:PDF>

Europäische Kommission (Hrsg.) (2007c): Mitteilung der Kommission an den Rat und das Europäische Parlament (KOM (2007) 101 endgültig) - Schaffung des einheitlichen europäischen Luftraums durch funktionelle Luftraumblöcke: Sachstandsbericht zur Halbzeit. Vom 15.03.2007.

[http://www.europarl.europa.eu/meetdocs/2004\\_2009/documents/com/com\\_com\(2007\)0101\\_/com\\_com\(2007\)0101\\_de.pdf](http://www.europarl.europa.eu/meetdocs/2004_2009/documents/com/com_com(2007)0101_/com_com(2007)0101_de.pdf)

Europäische Kommission (Hrsg.) (2008): Mitteilung der Kommission an den Rat, das Europäische Parlament, den Europäischen Wirtschafts- und Sozialausschuss und den Ausschuss der Regionen (KOM (2008) 389/2) - Einheitlicher europäischer Luftraum II: Kurs auf einen nachhaltigeren und leistungsfähigeren Luftverkehr. Vom 25.06.2008.

<http://eur-lex.europa.eu/LexUriServ/LexUriServ.do?uri=COM:2008:0389:FIN:DE:PDF>

Europäische Kommission Generaldirektion Energie und Verkehr (Hrsg.) (2005): Das Programm SESAR.

[ec.europa.eu/dgs/energy\\_transport/publication/memos/2005\\_11\\_sesar\\_de.pdf](http://ec.europa.eu/dgs/energy_transport/publication/memos/2005_11_sesar_de.pdf)

Europäische Union (Hrsg.) (2004a): Verordnung Nr. 549/2004 des Europäischen Parlaments und des Rates vom 10. März 2004 zur Festlegung des Rahmens für die Schaffung eines einheitlichen europäischen Luftraums.

[http://eur-](http://eur-lex.europa.eu/LexUriServ/LexUriServ.do?uri=OJ:L:2004:096:0020:0024:de:PDF)

[lex.europa.eu/LexUriServ/LexUriServ.do?uri=OJ:L:2004:096:0020:0024:de:PDF](http://eur-lex.europa.eu/LexUriServ/LexUriServ.do?uri=OJ:L:2004:096:0020:0024:de:PDF)

Europäische Union (Hrsg.) (2004b): Verordnung Nr. 550/2004 des Europäischen Parlaments und des Rates vom 10. März 2004 über die Erbringung von Flugsicherungsdiensten im einheitlichen europäischen Luftraum.

[http://eur-](http://eur-lex.europa.eu/LexUriServ/LexUriServ.do?uri=OJ:L:2004:096:0010:0019:DE:PDF)

[lex.europa.eu/LexUriServ/LexUriServ.do?uri=OJ:L:2004:096:0010:0019:DE:PDF](http://eur-lex.europa.eu/LexUriServ/LexUriServ.do?uri=OJ:L:2004:096:0010:0019:DE:PDF)

Europäische Union (Hrsg.) (2004c): Verordnung Nr. 551/2004 des Europäischen Parlaments und des Rates vom 10. März 2004 über die Ordnung und Nutzung des Luftraums im einheitlichen europäischen Luftraum.

[http://eur-](http://eur-lex.europa.eu/LexUriServ/LexUriServ.do?uri=OJ:L:2004:096:0020:0024:DE:PDF)

[lex.europa.eu/LexUriServ/LexUriServ.do?uri=OJ:L:2004:096:0020:0024:DE:PDF](http://eur-lex.europa.eu/LexUriServ/LexUriServ.do?uri=OJ:L:2004:096:0020:0024:DE:PDF)

Europäische Union (Hrsg.) (2004d): Verordnung Nr. 552/2004 des Europäischen Parlaments und des Rates vom 10. März 2004 über die Interoperabilität des europäischen Flugverkehrsmanagementnetzes.

[http://eur-](http://eur-lex.europa.eu/LexUriServ/LexUriServ.do?uri=OJ:L:2004:096:0026:0042:DE:PDF)

[lex.europa.eu/LexUriServ/LexUriServ.do?uri=OJ:L:2004:096:0026:0042:DE:PDF](http://eur-lex.europa.eu/LexUriServ/LexUriServ.do?uri=OJ:L:2004:096:0026:0042:DE:PDF)

Europäische Union (Hrsg.) (2005): Verordnung Nr. 2150/2005 der Kommission über gemeinsame Regeln für die flexible Luftraumnutzung Vom 23.12.2005.

[http://eur-](http://eur-lex.europa.eu/LexUriServ/LexUriServ.do?uri=OJ:L:2005:342:0020:0025:DE:PDF)

[lex.europa.eu/LexUriServ/LexUriServ.do?uri=OJ:L:2005:342:0020:0025:DE:PDF](http://eur-lex.europa.eu/LexUriServ/LexUriServ.do?uri=OJ:L:2005:342:0020:0025:DE:PDF)

Europäisches Parlament (Hrsg.) (1998): Themenpapier Nr.2 - Umwelt und Luftverkehr. Vom 29.05.1998.

[www.europarl.europa.eu/workingpapers/envi/pdf/brief2de\\_de.pdf](http://www.europarl.europa.eu/workingpapers/envi/pdf/brief2de_de.pdf)

Europäisches Parlament (Hrsg.) (2007): Emissionshandel im Luftverkehr ab 2011. Vom 13.11.2007.

<http://www.europarl.europa.eu/sides/getDoc.do?language=DE&type=IM-PRESS&reference=20071109IPR12781>

Europäisches Verbraucherzentrum (Hrsg.) (2008): Mehrwertsteuersätze in den Mitgliedstaaten der Europäischen Union.

<http://www.evz.de/UNI123166865700856/doc424A.html>

European Commission (Hrsg.) (2001): Application of Hybrid Laminar Flow Control Technology on Transport Aircraft (ALTTA).

<http://ec.europa.eu/research/growth/aeronautics-days/pdf/posters/allta.pdf>

European Commission (Hrsg.) (2004): H2Aircraft - Cryoplane and the Future of Flight.

[http://ec.europa.eu/research/transport/news/article\\_786\\_en.html](http://ec.europa.eu/research/transport/news/article_786_en.html)

European Commission (Hrsg.) (2005): Reducing the Climate Change Impact of Aviation (COM (2005) 459 final). Vom 27.09.2005.

<http://eur-lex.europa.eu/LexUriServ/LexUriServ.do?uri=COM:2005:0459:FIN:EN:PDF>

European Commission (Hrsg.) (2007a): Environment - Commissioner Dimas Welcomes Council Results on Climate Change and Pesticides. Medienmitteilung vom 20.02.2007.

<http://europa.eu/rapid/pressReleasesAction.do?reference=MEMO/07/69&format=HTML&aged=1&language=EN&guiLanguage=de>

European Commission (Hrsg.) (2007b): NACRE Project Supporting Future Aircraft Development. Medienmitteilung vom 08.11.2007.

[http://ec.europa.eu/research/transport/news/article\\_6357\\_en.html](http://ec.europa.eu/research/transport/news/article_6357_en.html)

European Commission (Hrsg.) (2008a): EU Action Against Climate Change.

[http://ec.europa.eu/climateaction/eu\\_action/index\\_en.htm](http://ec.europa.eu/climateaction/eu_action/index_en.htm)

European Commission (Hrsg.) (2008b): Adoption of the 2nd Package of the Single European Sky (SES II). Vom 25.06.2008.

[http://ec.europa.eu/transport/air\\_portal/traffic\\_management/ses2/index\\_en.htm](http://ec.europa.eu/transport/air_portal/traffic_management/ses2/index_en.htm)

European Parliament (Hrsg.) (2008a): MEPs and Council Presidency Reach Deal on Airline Emissions. Medienmitteilung vom 26.06.2008.

[http://www.europarl.europa.eu/news/expert/infopress\\_page/064-32956-175-06-26-911-20080627IPR32955-23-06-2008-2008-false/default\\_de.htm](http://www.europarl.europa.eu/news/expert/infopress_page/064-32956-175-06-26-911-20080627IPR32955-23-06-2008-2008-false/default_de.htm)

European Parliament (Hrsg.) (2008b): Non-legislative Resolution vom 24.04.2008.

<http://www.europarl.europa.eu/oeil/file.jsp?id=5531682>

European Parliament (Hrsg.) (2008c): MEPs and Council Presidency Reach Deal on CO2 Emissions from Cars. Medienmitteilung vom 02.12.2008.

[http://www.europarl.europa.eu/news/expert/infopress\\_page/064-43442-336-12-49-911-20081202IPR43441-01-12-2008-2008-false/default\\_en.htm](http://www.europarl.europa.eu/news/expert/infopress_page/064-43442-336-12-49-911-20081202IPR43441-01-12-2008-2008-false/default_en.htm)

Eury, S. (2005): Research and Technology at Snecma to Ensure Sustained Development of Air Transportation.

<http://www.aiaa.org/events/aners/Presentations/ANERS-Eury.pdf>

FAA - Federal Aviation Administration (Hrsg.) (1990): Federal Aviation Regulation 25.803 Emergency Evacuations.

[http://www.flightsimaviation.com/data/FARS/part\\_25-803.html](http://www.flightsimaviation.com/data/FARS/part_25-803.html)

FAA - Federal Aviation Administration (Hrsg.) (2008b): Air Traffic Control.

[http://www.faa.gov/airports\\_airtraffic/air\\_traffic/publications/at\\_orders/media/ATC.pdf](http://www.faa.gov/airports_airtraffic/air_traffic/publications/at_orders/media/ATC.pdf)

FAA - Federal Aviation Administration (Hrsg.) (2007): En Route Automation Modernization (ERAM). Medienmitteilung vom 09.10.2007.  
[http://www.faa.gov/news/fact\\_sheets/news\\_story.cfm?newsId=7714](http://www.faa.gov/news/fact_sheets/news_story.cfm?newsId=7714)

FAA - Federal Aviation Administration (Hrsg.) (2008a): Fact Sheet - Commercial Aviation Alternative Fuels Initiative. Medienmitteilung vom 03.01.2008.  
[http://www.faa.gov/news/fact\\_sheets/news\\_story.cfm?newsId=10112](http://www.faa.gov/news/fact_sheets/news_story.cfm?newsId=10112)

FAB Europe Central Initiative (Hrsg.) (2008a): FAB Europe Central Enters a New Phase. Medienmitteilung vom 22.07.2008.  
[http://www.fab-europe-central.eu/fab/english/inhalt/download/final\\_press\\_release\\_22jul08\\_uk.pdf](http://www.fab-europe-central.eu/fab/english/inhalt/download/final_press_release_22jul08_uk.pdf)

FAZ - Frankfurter Allgemeine Zeitung (Hrsg.) (2008a): Ölpreis knackt 139-Dollar-Marke. Medienmitteilung vom 06.06.2008.  
<http://www.faz.net/s/Rub050436A85B3A4C64819D7E1B05B60928/Doc~E151921487D03447D8CA8E42B2D2650D3~ATpl~Ecommon~Scontent.html>

FAZ - Frankfurter Allgemeine Zeitung (Hrsg.) (2008c): Optimismus im EP für Airline-Emissionshandel mit USA. Vom 02.07.2008.  
<http://www.faz.net/d/invest/meldung.aspx?id=79404476>

FAZ - Frankfurter Allgemeine Zeitung (Hrsg.) (2008d): Furcht bei Flughafen und Airlines. Vom 14.07.2008.  
[http://www.faz.net/s/RubBEFA4EA6A59441D98AC2EC17C392932A/Doc~E820B3237B798471FA1727826F3C4EC7C~ATpl~Ecommon~Scontent.html?rss\\_googfeed](http://www.faz.net/s/RubBEFA4EA6A59441D98AC2EC17C392932A/Doc~E820B3237B798471FA1727826F3C4EC7C~ATpl~Ecommon~Scontent.html?rss_googfeed)

Financial Times Deutschland (Hrsg.) (2008): Lufthansa ersteht 30 Bombardier-Jets. Vom 14.07.2008  
<http://www.ftd.de/unternehmen/industrie/:Kerosinpreistrally%20Lufthansa%20Bombardier%20Jets/385339.html>

Financial Times Deutschland (Hrsg.) (2008a): Auslese am Himmel. Vom 13.06.2008.  
[http://www.ftd.de/boersen\\_maerkte/investmentfonds/:Portfolio%20Auslese%20Himmel/371337.html](http://www.ftd.de/boersen_maerkte/investmentfonds/:Portfolio%20Auslese%20Himmel/371337.html)

Flightglobal (Hrsg.) (2008): Boeing Hints at GTF 737 Re-engining Study. Medienmitteilung vom 17.09.2008.  
<http://www.flightglobal.com/articles/2008/09/17/316070/picture-boeing-hints-at-gtf-737-re-engining-study.html>

FOE - Friends of the Earth (Hrsg.) (2007): PBR and Climate Change: The Government Fails to Deliver.  
[http://www.foe.co.uk/resource/press\\_releases/pbr\\_and\\_climate\\_change\\_the\\_09102007.html](http://www.foe.co.uk/resource/press_releases/pbr_and_climate_change_the_09102007.html)

Frost & Sullivan (Hrsg.) (2008a): Synthetischer FT-Treibstoff: Alternativlösung für die Luftfahrt? Vom 01.07.2008.  
<http://www.frost.com/prod/servlet/press-release.pag?docid=136178375>

Fuels from Agriculture in Communal Technology Foundation (Hrsg.) (2007): Position Paper on Jatropha Curcas. Vom 20.06.2007.  
[www.fact-fuels.org/media\\_en/Position\\_Paper\\_on\\_Jatropha\\_Curcas](http://www.fact-fuels.org/media_en/Position_Paper_on_Jatropha_Curcas)

G8 (Hrsg.) (2008): Environment and Climate Change. Vom 08.07.2008.  
[http://www.bmu.de/files/pdfs/allgemein/application/pdf/g8\\_declaration\\_environment\\_climate\\_change.pdf](http://www.bmu.de/files/pdfs/allgemein/application/pdf/g8_declaration_environment_climate_change.pdf)

Gouldstone, C. (2004): Formation Flight Feasibility Study - Final Presentation. Vom 05.05.2004  
[http://ocw.mit.edu/NR/rdonlyres/Aeronautics-and-Astronautics/16-886Spring2004/63061AB4-5F5C-4422-AE49-6AE20C1C95A1/0/Final\\_Presentation2B\\_rev.pdf](http://ocw.mit.edu/NR/rdonlyres/Aeronautics-and-Astronautics/16-886Spring2004/63061AB4-5F5C-4422-AE49-6AE20C1C95A1/0/Final_Presentation2B_rev.pdf)

Greenwich University (Hrsg.) (2008): Scientists Address Evacuation Concerns over Futuristic 'Flying Wing' Aircraft. Medienmitteilung vom 04.07.2008.  
<http://www.gre.ac.uk/pr/articles/latest/a1558---evacuation-concerns>

Handelsblatt (Hrsg.) (2008a): Airbus will neue A320 im Jahr 2014 starten. Vom 08.07.2008.  
<http://www.handelsblatt.com/unternehmen/industrie/airbus-will-neue-a320-im-jahr-2014-starten;2009007>

Hansen, J. und R. Cobligh (2002): Induced Moment Effects of Formation Flight Using Two F/A-18 Aircraft.  
[http://www.nasa.gov/centers/dryden/pdf/88744main\\_H-2502.pdf](http://www.nasa.gov/centers/dryden/pdf/88744main_H-2502.pdf)

Henne, J. (2008): Update on Technology. In: MTU Aero Engines - Investor and Analyst Day 2008.  
[http://www.mtu.de/de/investorrelations/financial\\_reports\\_figures/2008\\_Investor\\_and\\_Analyst\\_Day.pdf](http://www.mtu.de/de/investorrelations/financial_reports_figures/2008_Investor_and_Analyst_Day.pdf)

HM Revenue & Customs (Hrsg.) (2007): 2007 Pre-Budget Report and Comprehensive Spending Review.  
<http://www.hmrc.gov.uk/pbr2007/pbrn24.pdf>

Högelsberger, H. (Hrsg.) (2007): Dossier Impact des Flugverkehrs auf das Weltklima.  
[http://www.global2000.at/files/Dossier\\_Flugverkehr\\_Endversion.pdf](http://www.global2000.at/files/Dossier_Flugverkehr_Endversion.pdf)

Holmgren, J. (2008): Bio Aviation Fuel.  
<http://www.uop.com/renewables/Presentations/World%20Biofuels%20Congress08%20-%20BioAviation%20Fuel.pdf>

IACA - International Air Carrier Association (Hrsg.) (2008): Single Sky Package II: A Crucial and Welcome Step Towards a Single Sky. Medienmitteilung vom 25.06.2008.  
<http://www.iaca.be/index.cfm?C043C2F0-BDBE-2776-0F9D-3E8C34154D8C>

IATA - International Air Transport Association (Hrsg.) (2007a): Environment.  
[http://www.iata.org/whatwedo/environment/climate\\_change.htm](http://www.iata.org/whatwedo/environment/climate_change.htm)

IATA - International Air Transport Association (Hrsg.) (2007b): The Effect of Charges and Taxes on the Wider Economy.

[www.iata.org/NR/rdonlyres/1B98FE46-56F7-458F-986D-5B5979140289/0/Effect\\_wider\\_economy\\_Feb07.pdf](http://www.iata.org/NR/rdonlyres/1B98FE46-56F7-458F-986D-5B5979140289/0/Effect_wider_economy_Feb07.pdf)

IATA - International Air Transport Association (Hrsg.) (2007c): IATA Economic Briefing - Airline Fuel and Labour Cost Share.

[www.iata.org/NR/rdonlyres/4A49F6DA-2B12-48A9-A283-E035AEA5D165/0/Airline\\_Labour\\_Cost\\_Share.pdf](http://www.iata.org/NR/rdonlyres/4A49F6DA-2B12-48A9-A283-E035AEA5D165/0/Airline_Labour_Cost_Share.pdf)

IATA - International Air Transport Association (Hrsg.) (2008a): Strong 2007 Traffic Growth Set to Slow - Credit Crunch, Oil Prices To Dampen Demand. Medienmitteilung vom 31.01.2008.

<http://www.iata.org/pressroom/pr/2008-01-31-01.htm>

IATA - International Air Transport Association (Hrsg.) (2008b): Traffic Slowdown Continues - Asia Leads August Decline. Medienmitteilung vom 24.10.2008.

<http://www.iata.org/pressroom/pr/2008-09-30-01.htm>

IATA - International Air Transport Association (Hrsg.) (2008c): Alarming Drop for September International Traffic. Medienmitteilung vom 30.09.2008.

<http://www.iata.org/pressroom/pr/2008-10-24-01.htm>

IATA - International Air Transport Association (Hrsg.) (2008d): Financial Forecast September 2008.

<http://www.iata.org/NR/rdonlyres/25AF6DD6-A677-4C7F-86FB-7ECE56DA702C/0/IATAEconomicBriefingFinancialForecastAugust08.pdf>

IATA - International Air Transport Association (Hrsg.) (2008e): Annual Report 2008.

<http://www.iata.org/NR/rdonlyres/84158349-7772-4892-86AB-836DE73E0A52/0/IATAAnnualReport2008.pdf>

IATA - International Air Transport Association (Hrsg.) (2008f): IATA 2007 Report on Alternative Fuels.

[www.iata.org/NR/rdonlyres/329E1C20-1A46-4E02-9F68-BAD5C9080F31/60972/ReportonAlternativeFuels.pdf](http://www.iata.org/NR/rdonlyres/329E1C20-1A46-4E02-9F68-BAD5C9080F31/60972/ReportonAlternativeFuels.pdf)

IATA - International Air Transport Association (Hrsg.) (2008g): Alternative Fuels.

[http://www.iata.org/pressroom/facts\\_figures/fact\\_sheets/alt\\_fuels.htm](http://www.iata.org/pressroom/facts_figures/fact_sheets/alt_fuels.htm)

IATA - International Air Transport Association (Hrsg.) (2008h): Jet Fuel Price Monitor.

[http://www.iata.org/whatwedo/economics/fuel\\_monitor/](http://www.iata.org/whatwedo/economics/fuel_monitor/)

IATA - International Air Transport Association (Hrsg.) (2008i): Infrastructure.

[http://www.iata.org/pressroom/facts\\_figures/fact\\_sheets/Infrastructure.htm](http://www.iata.org/pressroom/facts_figures/fact_sheets/Infrastructure.htm)

IATA - International Air Transport Association (Hrsg.) (2008j): A Step Forward On Single European Sky. Medienmitteilung vom 25.06.2008.

<http://www.iata.org/pressroom/pr/2008-06-25-03.htm>

ICAO - International Civil Aviation Organization (Hrsg.) (2002): Events of September 11 Have Strong Negative Impact on Airline Financial Results for 2001. Medienmitteilung vom 28.05.2002.

[http://www.icao.int/icao/en/nr/2002/pio200206\\_e.pdf](http://www.icao.int/icao/en/nr/2002/pio200206_e.pdf)

ICAO - International Civil Aviation Organization (Hrsg.) (2006b): Annual Review of Civil Aviation 2005.

[http://www.icao.int/icao/en/jr/2006/6105\\_en.pdf](http://www.icao.int/icao/en/jr/2006/6105_en.pdf)

ICAO - International Civil Aviation Organization (Hrsg.) (2007a): Buoyancy in Airline Traffic Continues in 2007. Medienmitteilung vom 21.12.2007.

[http://www.icao.int/icao/en/nr/2007/pio200713\\_e.pdf](http://www.icao.int/icao/en/nr/2007/pio200713_e.pdf)

ICAO - International Civil Aviation Organization (Hrsg.) (2007b): Growth in Air Traffic Projected to Continue to 2025. Medienmitteilung vom 14.01.2007.

[http://www.icao.int/icao/en/nr/2007/pio200708\\_e.pdf](http://www.icao.int/icao/en/nr/2007/pio200708_e.pdf)

ICAO - International Civil Aviation Organization (Hrsg.) (2007c): Participants of ICAO Environmental Meeting Agreed on Guidance for Aviation Emissions Trading. Medienmitteilung vom 16.02.2007.

[http://www.icao.int/icao/en/nr/2007/pio200701\\_e.pdf](http://www.icao.int/icao/en/nr/2007/pio200701_e.pdf)

ICAO - International Civil Aviation Organization (Hrsg.) (2008a): Information Paper - Group on International Aviation and Climate Change - Second Meeting.

[http://www.icao.int/env/meetings/2008/giacc\\_2/giacc\\_2/GIACC2\\_ip02.pdf](http://www.icao.int/env/meetings/2008/giacc_2/giacc_2/GIACC2_ip02.pdf)

ICAO - International Civil Aviation Organization (Hrsg.) (2008b): Aircraft Engine Emissions .

<http://www.icao.int/icao/en/env/aee.htm>

ICCEPT - Imperial College Centre for Energy Policy and Technology (Hrsg.) (2003): The Potential for Renewable Energy Sources in Aviation.

<http://www3.imperial.ac.uk/pls/portallive/docs/1/7294712.PDF>

IMF - International Monetary Fund (Hrsg.) (2008a): World Economic Outlook Update. Medienmitteilung vom 06.11.2008.

<http://www.imf.org/external/pubs/ft/weo/2008/update/03/>

IMF - International Monetary Fund (Hrsg.) (2008b): Gross Domestic Product 1980 - 2007 (eigene Abfrage). Vom 17.11.2008.

[http://www.imf.org/external/pubs/ft/weo/2008/02/weodata/weoreptc.aspx?sy=1980&ey=2007&scsm=1&ssd=1&sort=country&ds=.&br=1&c=001&s=NGDP\\_RPCH&grp=1&a=1&pr.x=40&pr.y=8](http://www.imf.org/external/pubs/ft/weo/2008/02/weodata/weoreptc.aspx?sy=1980&ey=2007&scsm=1&ssd=1&sort=country&ds=.&br=1&c=001&s=NGDP_RPCH&grp=1&a=1&pr.x=40&pr.y=8)

IMF - International Monetary Fund (Hrsg.) (2008c): Commodity Prices and Global Inflation. Vom 08.05.2008.

<http://www.imf.org/external/np/speeches/2008/050808.htm>

JAL - Japan Airlines (Hrsg.) (2008): Japan Airlines Flight Demonstration of 2nd Generation Biofuel Planned. Medienmitteilung vom 23.06.2008.

<http://press.jal.co.jp/en/release/200806/000954.html>



Junior Research Group AEROTROP (Hrsg.) (2007): Neue Nachwuchsgruppe erforscht Klimawirksamkeit des Luftverkehrs. Medienmitteilung vom 16.04.2007.  
<http://www.pa.op.dlr.de/AEROTROP/news.html>

Krems, B. (2008): Management-Ebenen: operativ - taktisch - strategisch.  
[http://www.olev.de/o/operativ\\_usw.htm](http://www.olev.de/o/operativ_usw.htm)

Kurzke, J. (2008): Gas Turbine Performance. <http://www.gasturb.de/index.html>

Leipziger Volkszeitung (Hrsg.) (2008): Annäherungen beim Klimaschutz auf Weltverkehrsforum. Vom 08.06.2008.  
<http://www.lvz-online.de/aktuell/content/63907.html>

Los Angeles Times (Hrsg.) (2008): Jatropha Plant's Oil Studied as Biofuel for Jets. Vom 05.06.2008.  
<http://articles.latimes.com/2008/jun/05/business/fi-newfuel5>

Lufthansa Technik (Hrsg.) (2008a): Cyclean Engine Wash - Innovatives Verfahren zur Triebwerkswäsche. Vom 20.02.2008.  
[http://www.lufthansa-technik.com/applications/portal/lhtportal/lhtportal.portal?requestednode=4221&\\_pageLabel=Template7\\_8&\\_nfpb=true&webcacheURL=TV\\_I/Media-Relations/Media-Archive/Archive-Press-Releases/Press-Releases-2008/Singapore\\_Airshow\\_Cyclean\\_DE.xml&setLang=german](http://www.lufthansa-technik.com/applications/portal/lhtportal/lhtportal.portal?requestednode=4221&_pageLabel=Template7_8&_nfpb=true&webcacheURL=TV_I/Media-Relations/Media-Archive/Archive-Press-Releases/Press-Releases-2008/Singapore_Airshow_Cyclean_DE.xml&setLang=german)

Lufthansa Technik (Hrsg.) (2008b): Cyclean Engine Wash.  
[http://www.lufthansa-technik.com/bea/media-assets/references/WT/datasheets\\_cyclean\\_290408.pdf](http://www.lufthansa-technik.com/bea/media-assets/references/WT/datasheets_cyclean_290408.pdf)

Lufthansa Technik (Hrsg.) (2008c): Unternehmens-Profil.  
[http://www.lufthansa-technik.com/applications/portal/lhtportal/lhtportal.portal?\\_nfpb=true&\\_pageLabel=Template15&requestednode=16&action=initial&setLang=german](http://www.lufthansa-technik.com/applications/portal/lhtportal/lhtportal.portal?_nfpb=true&_pageLabel=Template15&requestednode=16&action=initial&setLang=german)

Martens, R. (2007): Future Engines - MTU Initiatives for Emission Reduction. In: MTU Aero Engines - Investor and Analyst Day 2007.  
[http://www.mtu.de/de/investorrelations/introduction/gesamtpr\\_\\_sentation.pdf](http://www.mtu.de/de/investorrelations/introduction/gesamtpr__sentation.pdf)

Ministry of Finance Norway . (Hrsg.) (2008): Direct and Indirect Taxes - Main Features of the 2008 Proposal.  
<http://www.regjeringen.no/en/dep/fin/Selected-topics/The-National-Budget/Direct-and-Indirect-Taxes---Main-Feature.html?id=485144>

Mitsubishi Regional Jet (Hrsg.) (2008): Characteristics MRJ 90, MRJ70.  
<http://www.mrj-japan.com/>

MOF - Ministry of Finance Japan (Hrsg.) (2006): Comprehensive Handbook of Japanese Taxes 2006.  
<http://www.mof.go.jp/english/tax/taxes2006e.htm>.

MTU Aero Engines (Hrsg.) (2006): Der Getriebefan. Vom 02.08.2006  
[http://www.mtu.de/de/technologies/technologies\\_future/geared\\_turbofan/index.html](http://www.mtu.de/de/technologies/technologies_future/geared_turbofan/index.html)

MTU Aero Engines (Hrsg.) (2008): Der richtige Dreh. Medienmitteilung vom 21.05.2008.  
[http://www.mtu.de/de/take-off/report/archiv/1\\_2008/108\\_gtf/index.html](http://www.mtu.de/de/take-off/report/archiv/1_2008/108_gtf/index.html)

Mücke, J. und H. Kraemer (2008): EU-Einigung über CO<sub>2</sub>-Emissionshandel im Luftverkehr verteuert Flugtickets und behindert europäische Airlines im globalen Wettbewerb. Medienmitteilung vom 26.06.2008.  
[http://www.fdp-fraktion.de/webcom/show\\_websiteprog.php/\\_c-649/\\_lkm-84/\\_nr-10676/bis-/i.html](http://www.fdp-fraktion.de/webcom/show_websiteprog.php/_c-649/_lkm-84/_nr-10676/bis-/i.html)

Münchener Rück (Hrsg.) (2008): Katastrophenbilanz 2008 belegt: Klimaabkommen ist dringend nötig. Medienmitteilung vom 29.12.2008.  
[http://www.munichre.com/de/press/press\\_releases/2008/2008\\_12\\_29\\_press\\_release.aspx](http://www.munichre.com/de/press/press_releases/2008/2008_12_29_press_release.aspx)

Myclimate (Hrsg.) (2008): Klimaschutz - Handeln mit Weitsicht.  
<http://www.myclimate.org/>

NASA - National Aeronautics and Space Administration(Hrsg.) (2004): The Blended Wing Body.  
<http://oea.larc.nasa.gov/PAIS/BWB.html>

NASA - National Aeronautics and Space Administration(Hrsg.) (2007): NASA Langley Contrail Page.  
<http://www-pm.larc.nasa.gov/newcontrail.html>

National Renewable Energy Laboratory (Hrsg.) (1998): A Look Back at the US Department of Energy's Aquatic Species Program — Biodiesel from Algae.  
<http://www.nrel.gov/docs/legosti/fy98/24190.pdf>

New Mexico Insitute of Mining and Technology (Hrsg.) (2008): NM Tech Professor Aims To Make Algae More Efficient Fuel Source Than Corn. Medienmitteilung vom 26.06.2008.  
<http://www.nmt.edu/mainpage/news/2008/25june01.html>

Northrop Grumman (Hrsg.) (2007): B-2 Spirit Bomber.  
<http://www.is.northropgrumman.com/systems/b2spirit.html>

OAG - Offical Airline Guide (Hrsg.) (2007a): Statistical Review 2007.  
<http://www.oag.com/oagcorporate/pdf/OAGStatisticalReview2007.pdf>

OAG - Offical Airline Guide (Hrsg.) (2007b): OAG End of Year Review for 2007. Medienmitteilung vom 14.12.2007.  
<http://www.oag.com/oagcorporate/pressreleases/07+End+of+Year+Review+2007+1412071.html>

Penner, J. (2001): IPCC - Special Report on Aviation & Global Atmosphere. Vom 10.04.2001.  
[www.icao.int/icao/en/env/clq01/penner.ppt](http://www.icao.int/icao/en/env/clq01/penner.ppt)

PetroSA (Hrsg.) (2008): The PetroSA GTL Refinery & LTFT Technology Development.  
<http://www.petrosa.co.za/page.aspx?pagelId=b0e07c1b-b624-4a23-a2b5-5519aa0c33c7>

Pratt & Whitney (Hrsg.) (2008): Pratt & Whitney EcoPower Engine Wash Eliminates Millions of Pounds in Carbon Dioxide Emissions, Fuel Consumption and Cost for Airlines in the United Kingdom. Medienmitteilung vom 14.07.2008.  
[http://www.pw.utc.com/vgn-ext-templating/v/index.jsp?vgnextoid=2e35288d1c83c010VgnVCM1000000881000aRCRD&prid=782e8b55d7b1b110VgnVCM100000c45a529f\\_\\_\\_\\_\\_](http://www.pw.utc.com/vgn-ext-templating/v/index.jsp?vgnextoid=2e35288d1c83c010VgnVCM1000000881000aRCRD&prid=782e8b55d7b1b110VgnVCM100000c45a529f_____)

Radio Netherlands (Hrsg.) (2008): KLM to Fly on Algae. Medienmitteilung vom 06.08.2008.  
<http://www.radionetherlands.nl/currentaffairs/region/netherlands/080526-klm-algae>

Reuters India (Hrsg.) (2008): Indian States to Mull Jet Fuel Tax Cuts Next Week. Medienmitteilung vom 11.06.2008.  
<http://in.reuters.com/article/economicNews/idINIndia-34017120080611>.

Reuters UK (Hrsg.) (2008): Sasol Says Optimising Output at Qatar GTL Plant. Vom 01.07.2008.  
<http://uk.reuters.com/article/rbssIndustryMaterialsUtilitiesNews/idUKL0134737420080701>

Rolls Royce (Hrsg.) (2006): Market Outlook 2006 - 2025.  
[www.rolls-royce.com/civil\\_aerospace/overview/market/outlook/downloads/outlook2006b.pdf](http://www.rolls-royce.com/civil_aerospace/overview/market/outlook/downloads/outlook2006b.pdf)

Rolls Royce (Hrsg.) (2007): DREAM - validation of Radical Engine Architecture systems. Vom 15.01.2007.  
[www.ecare-sme.org/plus/download/10\\_DREAM.pdf](http://www.ecare-sme.org/plus/download/10_DREAM.pdf)

Rüd, K. (2008): Green Aircraft - Der Beitrag der Triebwerkstechnologie zur Verbesserung der Umweltbilanz. Vom 26.05.2008.  
[http://www.bdfaero.com/080526\\_Vortrag\\_MTU.pdf](http://www.bdfaero.com/080526_Vortrag_MTU.pdf)

Ryanair (Hrsg.) (2005): Strategy.  
<http://www.ryanair.com/site/about/invest/docs/Strategy.pdf>

Sasol (Hrsg.) (2008a): Sasol Achieves Approval for 100% Synthetic Jet Fuel. Medienmitteilung vom 28.08.2008.  
[http://www.sasol.com/sasol\\_internet/frontend/navigation.jsp?articleTypeID=2&articleId=21200009&navid=1&rootid=1](http://www.sasol.com/sasol_internet/frontend/navigation.jsp?articleTypeID=2&articleId=21200009&navid=1&rootid=1)

Sasol (Hrsg.) (2008b): Sasol and Shenhua Agree to Focus Full Attention on the Ningxia Hui Coal to Liquids (CTL) Feasibility Study. Medienmitteilung vom 09.04.2008.

[http://www.sasol.com/sasol\\_internet/frontend/navigation.jsp;jsessionid=0FICCTJ5VS2EVG5N4EZSFEQ?articleTypeID=2&articleId=22600001&navid=1&rootid=1](http://www.sasol.com/sasol_internet/frontend/navigation.jsp;jsessionid=0FICCTJ5VS2EVG5N4EZSFEQ?articleTypeID=2&articleId=22600001&navid=1&rootid=1)

SBAC - Society of British Aerospace Companies (Hrsg.) (2008a): ACARE Explained. <http://www.sbac.co.uk/community/dms/download.asp?txtFilePK=5750>

SBAC - Society of British Aerospace Companies (Hrsg.) (2008b): Aircraft Technology and Emissions.

<http://www.sbac.co.uk/community/dms/download.asp?txtFilePK=5619>

SESAR Consortium (Hrsg.) (2008a): What is SESAR?

<http://www.sesar-consortium.aero/phase1.php>

T&E - European Federation for Transport and Environment (Hrsg.) (2008): T&E Reaction to EU Aviation Emissions Trading Agreement Medienmitteilung vom 27.06.2008.

<http://www.transportenvironment.org/News/2008/6/TE-reaction-to-EU-Aviation-Emissions-Trading-Agreement/>

TELFONA Consortium (Hrsg.) (2005): TELFONA - Testing For Laminar Flow On New Aircraft.

[http://www.telfona.com/uploads/media/Telfona\\_brochure.pdf](http://www.telfona.com/uploads/media/Telfona_brochure.pdf)

Thaindian News (Hrsg.) (2008): Bigger Airlines Lose Passengers as Rising Fuel Costs Push up Fares.

[http://www.thaindian.com/newsportal/business/bigger-airlines-lose-passengers-as-rising-fuel-costs-push-up-fares\\_10055304.html](http://www.thaindian.com/newsportal/business/bigger-airlines-lose-passengers-as-rising-fuel-costs-push-up-fares_10055304.html)

The Guardian (Hrsg.) (2008a): Fuel Costs Kill Off a US Airline Every Week.

<http://www.guardian.co.uk/business/2008/may/25/theairlineindustry.usa>

The Guardian (Hrsg.) (2008b): Oil Price Forces American Airlines to Scrap 75 Planes.

<http://www.guardian.co.uk/business/2008/may/21/theairlineindustry.britishairwaysbusiness>

The Guardian (Hrsg.) (2008c): Oil Price Will Wipe Out Profits, Says Ryanair.

<http://www.guardian.co.uk/business/2008/jun/04/ryanair.oil>

The Independent (Hrsg.) (2008): Air France Tumbles on First Loss Since 2003, Oil-price Woes.

<http://www.independent.ie/business/european/air-france-tumbles-on-first-loss-since-2003-oilprice-woes-1383444.html>

The New York Times (Hrsg.) (2008): Like Motorists, Airlines Are Reducing Their Speed to Save Fuel Costs. Vom 02.05.2008.

[http://www.nytimes.com/2008/05/02/business/02air.html?\\_r=3&scp=1&sq=airlines+are+reducing+their+speed&st=nyt&oref=slogin&oref=slogin&oref=slogin](http://www.nytimes.com/2008/05/02/business/02air.html?_r=3&scp=1&sq=airlines+are+reducing+their+speed&st=nyt&oref=slogin&oref=slogin&oref=slogin)

Times Online (Hrsg.) (2008): Financial Crisis Sends Oil Prices Tumbling. Vom 15.09.2008.

[http://business.timesonline.co.uk/tol/business/industry\\_sectors/natural\\_resources/article4758134.ece](http://business.timesonline.co.uk/tol/business/industry_sectors/natural_resources/article4758134.ece)

UBA - Umweltbundesamt (Hrsg.) (2007a): Vergleich der Schadstoffemissionen einzelner Verkehrsträger.

<http://www.umweltbundesamt.de/uba-info-presse/hintergrund/Vergleich-Personenverkehr.pdf>

UBA - Umweltbundesamt (Hrsg.) (2007b): Verkehr - Biokraftstoff, Wasserstoff und Elektrizität.

[http://www.umweltbundesamt.de/verkehr/alternative-kraftstoffe/bio\\_wasser\\_elektro/index.htm](http://www.umweltbundesamt.de/verkehr/alternative-kraftstoffe/bio_wasser_elektro/index.htm)

UNFCCC - United Nations Framework Convention on Climate Change (Hrsg.) (2008): Clean Development Mechanism (CDM).

[http://unfccc.int/kyoto\\_protocol/mechanisms/clean\\_development\\_mechanism/items/2718.php](http://unfccc.int/kyoto_protocol/mechanisms/clean_development_mechanism/items/2718.php)

United Nations (Hrsg.) (1998): Kyoto Protocol on the United Nations Framework Convention on Climate Change.

<http://unfccc.int/resource/docs/convkp/kpeng.pdf>

United Nations (Hrsg.) (2007): Secretary-General, in Statement with Chile's President, Sounds New Climate Change Warning as He Describes Vanishing Glaciers, Melting Western Ice Shelf. Vom 12.11.2007

<http://www.un.org/News/Press/docs/2007/sgsm11271.doc.htm>

United Nations (Hrsg.) (2008): Biofuel Production is 'Criminal Path' Leading to global Food Crisis. Vom 28.04.2008.

<http://www.un.org/apps/news/story.asp?NewsID=26478&Cr=food&Cr1=ziegler>

University of Leeds (Hrsg.) (2008): OMEGA - Modelling Aviation's Impact on Climate.

[http://see.leeds.ac.uk/research/ias/climate\\_change/projects/omega.htm](http://see.leeds.ac.uk/research/ias/climate_change/projects/omega.htm)

University of Virginia (Hrsg.) (2008): Algae - Biofuel of the Future? Medienmitteilung vom 26.05.2008.

<http://www.virginia.edu/uvatoday/newsRelease.php?id=5985>

US Department of Energy Efficiency and Renewable Energy (Hrsg.) (2007): Remarks to the Algae Biomass Summit. Medienmitteilung vom 14.11.2007.

[http://apps1.eere.energy.gov/news/speeches/2007-11-14\\_algae.cfm](http://apps1.eere.energy.gov/news/speeches/2007-11-14_algae.cfm)

US Department of Transportation (Hrsg.) (2008): BTS Releases December 2007 Airline Traffic Data - US Airlines Carry Record 769 Million Passengers in 2007.

Medienmitteilung vom 13.03.2008.

[http://www.bts.gov/press\\_releases/2008/bts013\\_08/pdf/bts013\\_08.pdf](http://www.bts.gov/press_releases/2008/bts013_08/pdf/bts013_08.pdf)

Vachon, M., R. Ray, K. Walsh und K. Ennix (2003): F/A-18 Performance Benefits Measured During the Autonomous Formation Flight Project.  
[http://www.nasa.gov/centers/dryden/pdf/88749main\\_H-2505.pdf](http://www.nasa.gov/centers/dryden/pdf/88749main_H-2505.pdf)

Virgin Atlantic (Hrsg.) (2008a): Virgin Atlantic to Run 747 on Biofuel in February. Medienmitteilung vom 14.01.2008.  
<http://www.virgin-atlantic.com/en/gb/allaboutus/pressoffice/pressreleases/news/pr140108.jsp>

Virgin Atlantic (Hrsg.) (2008b): Virgin Atlantic Biofuel Demonstration Flight Update. Medienmitteilung vom 26.02.2008.  
<http://www.virgin-atlantic.com/en/gb/allaboutus/pressoffice/pressreleases/news/pr260208.jsp>

Volkswagen (Hrsg.) (2008): Technologien zur Biomass to Liquid- (BtL) Produktion stehen zur Verfügung. Medienmitteilung vom 24.09.2008.  
[http://www.volkswagenag.com/vwag/vwcorp/info\\_center/de/news/2008/05/Technologien\\_zur\\_Biomass\\_to\\_Liquid-\\_\\_BtL\\_\\_Produktion\\_stehen\\_zur\\_Verfuegung.html](http://www.volkswagenag.com/vwag/vwcorp/info_center/de/news/2008/05/Technologien_zur_Biomass_to_Liquid-__BtL__Produktion_stehen_zur_Verfuegung.html)

World Bank (Hrsg.) (2002): Using Jatropha Curcas Oil as Raw Material and Fuel.  
<http://www.worldbank.org/afr/ik/iknt47.pdf>

Wuppertal Institut für Klima, Umwelt, Energie. (Hrsg.) (2007): Herausforderungen nachhaltiger Verkehrspolitik - Welche Rolle spielt Verkehrsverlagerung? Vom 17.12.2007.  
[http://www.wupperinst.org/de/info/entwd/index.html?&beitrag\\_id=688](http://www.wupperinst.org/de/info/entwd/index.html?&beitrag_id=688)

WWF - World Wide Fund for Nature (Hrsg.) (2008): Interview mit WWF-Tourismusexpertin Birgit Weerts.  
<http://www.wwf.de/themen/tourismus/weerts/>

## **Anhang A: Staaten des Eurocontrolgebiets**

Albanien  
Armenien  
Belgien  
Bosnien und Herzegowina  
Bulgarien  
Dänemark  
Deutschland  
Ehemalige jugoslawische Republik Mazedonien  
Finnland  
Frankreich  
Griechenland  
Irland  
Italien  
Kroatien  
Litauen  
Luxemburg  
Malta  
Moldau  
Monaco  
Montenegro  
Niederlande  
Norwegen  
Österreich  
Polen  
Portugal  
Rumänien  
Schweden  
Schweiz  
Serbien  
Slowakei  
Slowenien  
Spanien  
Tschechische Republik  
Türkei  
Ukraine  
Ungarn  
Vereinigtes Königreich  
Zypern

Stand 01.07.2007 (Quelle: Eurocontrol 2008d)

## Anhang B: Übersicht der interviewten Experten

Person/Unternehmen	Position/Aufgabe	Hauptthemen	Datum/Ort
<b>Dr. Horst Bittlinger</b> Deutsche Lufthansa AG Lufthansa Aviation Center (LAC) Airportring 60549 Frankfurt am Main	General Manager, Konzernpolitik	Single European Sky, Perspektive der Deutschen Lufthansa	05.08.2008 Frankfurt LAC
<b>Dr. Andreas Waibel</b> Deutsche Lufthansa AG Lufthansa Aviation Center (LAC) Airportring 60549 Frankfurt am Main	Umweltkonzepte Konzern, Emission und Klima	Klimawirksam- keit der zivilen Luftfahrt, Maßnahmen der Deutschen Lufthansa, Emissions- handel	05.08.2008 Frankfurt LAC
<b>Thomas Reske</b> Deutsche Lufthansa AG Weg beim Jäger 193 22335 Hamburg	Abteilungsleiter, Flugzeugeinkauf und Triebwerksauswahl	Flotten- entwicklung und Triebwerks- auswahl der Deutschen Lufthansa, globale Trends	04.11.2008 Hamburg Deutsche Lufthansa AG
<b>Sebastian Giljohann</b> Lufthansa Technik AG Flughafen Frankfurt am Main 60549 Frankfurt am Main	Projektingenieur Water Wash	Innovative Triebwerks- wäsche Cyclean Engine Wash	06.11.2008 Hamburg/ Frankfurt (Telefon- interview)
<b>João Frota</b> Airbus 1, rond-point Maurice Bellonte, F-31707 Blagnac	Manager Propulsion and Environment, Projektleiter NACRE (New Aircraft Concept REsearch)	NACRE, technische Ent- wicklung, Emissions- handel, Wirtschaftslage	02.12.2008 Hamburg/ Blagnac (Telefon- interview)
<b>Björn Nagel</b> Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt (DLR), Institut für Luft- transportkonzepte und Technologiebewertung Blohm Str. 18 21079 Hamburg	Abteilungsleiter, Luftfahrzeugent- würfe und -systeme	Morphing Wing, technische Ent- wicklung, neue Transport- konzepte	20.11.2008 Hamburg DLR



<b>Person/Unternehmen</b>	<b>Position/Aufgabe</b>	<b>Hauptthemen</b>	<b>Datum/Ort</b>
<b>Werner Granzeier</b> Hochschule für Angewandte Wissen- schaften Hamburg (HAW) Berliner Tor 7 20099 Hamburg	Professor, Department für Fahrzeugtechnik und Flugzeugbau, Öffentlichkeitsarbeit	Innovative Flug- zeugkonzepte, Flugzeug- struktur	07.11.2008 Hamburg HAW
<b>Dr. J.G. Willy Bräunling</b> Hochschule für Angewandte Wissen- schaften Hamburg (HAW) Berliner Tor 7 20099 Hamburg	Professor, Department für Fahrzeugtechnik und Flugzeugbau	Triebwerksent- wicklung	30.10.2008 Hamburg HAW
<b>Karsten Smid</b> Greenpeace Große Elbstr. 39 22767 Hamburg	Kampagnenleiter, Klima und Energie	Klimawirksam- keit der zivilen Luftfahrt, Rolle der Industrie	24.11.2008 Hamburg Green- peace