

Emissionshandel im internationalen zivilen Luftverkehr

Berlin, Januar 2004

Bearbeitet durch
Dipl.-Volksw. Martin Cames
Dipl.-Ing. Odette Deuber

unter Mitarbeit von
Dipl.-Ing. Ulrike Rath

Öko-Institut e.V.

Büro Berlin
Novalisstraße 10
D-10115 Berlin
Tel.: +49-30-280 486-80
Fax: +49-30-280 486-88

Geschäftsstelle Freiburg
Binzengrün 34a
D-79114 Freiburg
Tel.: +49-761-452 95-0
Fax: +49-761-47 53 37

Büro Darmstadt
Elisabethenstr. 55-57
D-64283 Darmstadt
Tel.: +49-61 51-81 91-0
Fax: +49-61 51-81 91-33

Die Deutsche Bibliothek – CIP-Einheitstitelaufnahme

Ein Titeldatensatz für diese Publikation ist bei
Der Deutschen Bibliothek erhältlich

ISBN 3-934490-18-2

© 2004 Öko-Institut e.V., Institut für angewandte Ökologie, Freiburg-Darmstadt-Berlin

Berichts-Kennblatt

1. Berichtsnummer	2.	3.
4. Titel des Berichts Emissionshandel im internationalen zivilen Luftverkehr		
5. Autor(en), Name(n), Vorname(n) Cames, Martin Deuber, Odette	8. Abschlussdatum 31. August 2003	
6. Durchführende Institution (Name, Anschrift) Öko-Institut Novalisstr. 10 10115 Berlin	9. Veröffentlichungsdatum	
	10. UFOPLAN-Nr. 201 96 107	
	11. Seitenzahl 162	
7. Fördernde Institution (Name, Anschrift) Umweltbundesamt Postfach 330022 14191 Berlin	12. Literaturangaben ca. 100	
	13. Tabellen und Diagramme 39	
	14. Abbildungen 12	
15. Zusätzliche Angaben		
16. Kurzfassung Der Beitrag des internationalen Luftverkehrs zum Treibhauseffekt steigt kontinuierlich. Es wird untersucht, wie der Beitrag des Luftverkehrs durch Emissionshandel reduziert bzw. begrenzt werden kann. Dabei werden sowohl die unterschiedlichen Ausgestaltungsoptionen (Handelsregime, Bemessungsgrundlage, Verpflichtete etc.) als auch die Vermeidungskosten und -potenziale verschiedener Minderungsmaßnahmen (Flugroutenoptimierung, frühzeitige Stilllegung, Verbesserung der Aerodynamik etc.) betrachtet. Die Studie zeigt, dass ein Emissionshandelssystem im Luftverkehr möglich und sinnvoll ist. Wichtig ist jedoch, dass dabei die gesamte Klimawirksamkeit des Luftverkehrs erfasst wird, da es sonst zu Fehlsteuerungen kommen kann.		
17. Schlagwörter Emissionshandel, internationaler Luftverkehr, Bemessungsgrundlage, Nachweispflichtige Akteure, Treibhauseffekt, CO ₂ -Emissionen, NO _x -Emissionen, Wasserdampfemissionen, Kondensstreifen, Zirruswolken, Strahlungsantrieb, Strahlungsantriebsfaktor, Treibhausgaspotenzial, Flugroutenoptimierung, Vermeidungspotenzial		
18. Preis	19.	20.

Report Data Sheet

1. Report No.	2.	3.
5. Report Title Emissions trading in international civil aviation		
5. Author(s), Family Name(s), First Name(s) Cames, Martin Deuber, Odette		8. Report Date 31. August 2003
6. Performing Organisation (Name, Address) Öko-Institut Novalisstr. 10 10115 Berlin		9. Publication Date
		10. UFOPLAN-Ref. No. 201 96 107
		11. No. of Pages 162
		12. No. of References app. 100
7. Funding Agency (Name, Address) (Federal Environmental Protection Agency) Umweltbundesamt Postfach 330022 14191 Berlin		13. No. of Tables, Diagrams 39
		14. No. of Figures 12
15. Supplementary Notes		
16. Abstract The contribution of international aviation to the greenhouse effect is increasing continually. The study investigates how the contribution of aviation can be reduced or limited through emissions trading. Not only are different design options (trading regime, basis for assessment, obligated parties etc.) examined, but also the avoidance costs and potentials of different reduction measures (flight route optimization, early retirement of aircraft, improvement of aerodynamics etc.). The study shows that an emissions trading system for aviation is both possible and sensible. It is important, however, that the total climatic impact of aviation be covered, for otherwise misdirected control might be the result.		
17. Keywords Emissions trading, international aviation, basis for assessment, obligated parties, greenhouse effect, CO ₂ emissions, NO _x emissions, water vapour emissions, contrails, cirrus clouds, radiative forcing, radiative forcing index, greenhouse gas potential, flight-route optimization, avoidance potential		
18. Price	19.	20.

Inhaltsverzeichnis

1. Einleitung	9
2. Die Politikarena des internationalen Luftverkehrs	11
2.1 Die Klimarahmenkonvention	11
2.2 International Civil Aviation Organization.....	12
2.3 Europäische Union	16
2.4 Deutsche Bundesregierung	20
2.5 Nichtregierungsorganisationen	21
2.5.1 <i>Transport and Environment und International Coalition for Sustainable Aviation</i>	21
2.5.2 <i>Center for Clean Air Policy</i>	23
2.5.3 <i>Germanwatch</i>	23
2.6 Akteure der Wirtschaft: Fluggesellschaften und Flugzeughersteller	24
2.7 Politische Rahmenbedingungen für die Einführung eines Emissionshandelssystems.....	25
3. Die klimarelevanten Emissionen des Luftverkehrs	27
3.1 Entstehungsort der Emissionen im Luftverkehr	27
3.2 Auswirkungen des Luftverkehrs auf den Treibhauseffekt.....	28
3.3 Quantifizierung der Wirkung auf den Treibhauseffekt	34
3.3.1 <i>Maß der Quantifizierung</i>	35
3.3.2 <i>Quantifizierung der Wirkung im Jahr 1992</i>	37
3.3.3 <i>Quantifizierung der Wirkung im Jahr 2050</i>	42
4. Zentrale Ausgestaltungsoptionen	45
4.1 Abgrenzung	46
4.2 Handelsregime	49
4.3 Ansatz	51
4.4 Bemessungsgrundlage	54
4.4.1 <i>Anforderungen an eine Bemessungsgrundlage</i>	54
4.4.2 <i>Bemessungsgrundlagen im Vergleich</i>	56
4.4.3 <i>Bestimmung der Emissionsmengen</i>	62
4.5 Verpflichtete.....	75
4.5.1 <i>Verpflichtungsstruktur</i>	76
4.5.2 <i>Zuordnung der Emissionen</i>	80
4.5.3 <i>Nachweispflichtige Akteure</i>	85
4.6 Primärallokation.....	89
4.6.1 <i>Ebenen der Allokation</i>	90
4.6.2 <i>Verfahren der Primärallokation</i>	92

4.7	Monitoring.....	98
4.8	Sanktionen	100
4.9	Cap.....	102
4.10	Übersicht	104
5.	Perspektiven des Luftverkehrs.....	106
5.1	NASA, ANCAT und DLR.....	108
5.2	ICAO.....	109
5.3	EDF	111
5.4	AERO-Modellsystem	114
6.	Optionen zur Minderung der Klimawirksamkeit des Luftverkehrs.....	120
6.1	Flugroutenoptimierung unter Klimagesichtspunkten.....	120
6.1.1	<i>Aktuelle Forschungsergebnisse.....</i>	<i>122</i>
6.1.2	<i>Abschätzung der spezifischen Vermeidungskosten von Kondensstreifen und Zirruswolken</i>	<i>128</i>
6.1.3	<i>Vermeidungspotenzial von Kondensstreifen und Zirruswolken</i>	<i>139</i>
6.2	Kommunikations-, Navigations- und Überwachungssysteme.....	142
6.3	Flight Management.....	143
6.4	Bessere Auslastung.....	144
6.5	Instandhaltung	144
6.6	Optimierung des Triebwerkes unter Klimagesichtspunkten.....	145
6.7	Verbesserung der Aerodynamik.....	146
6.7.1	<i>Winglets</i>	<i>146</i>
6.7.2	<i>Riblets.....</i>	<i>147</i>
6.7.3	<i>Potenzial</i>	<i>148</i>
6.8	Frühzeitige Stilllegung von Flugzeugen	148
6.9	Fazit	149
7.	Schlussfolgerung	153
8.	Literatur	159

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1:	Flugphasen.....	27
Abbildung 2:	Globale Verteilung von Kondensstreifen in der Atmosphäre und jährlicher Durchschnittswert für Klimabedingungen und Kondensstreifenbedeckung im Jahr 1992	31
Abbildung 3:	Luftverkehrsbedingter Strahlungsantrieb im Jahr 1992	38

Abbildung 4:	Zonen- und jährliche mittlere Strahlungsungleichgewichte in der Tropopause (nach Anpassung der stratosphärischen Temperatur) als eine Funktion der geographischen Breite in Folge des Luftverkehrs im Jahr 1992.....	39
Abbildung 5:	Luftverkehrsbedingter Strahlungsantrieb im Jahr 2050	43
Abbildung 6:	Strahlungsantrieb der Überschallflugzeuge (HSCT) und der ersetzen Unterschallflugzeuge für das Jahr 2050	43
Abbildung 7:	Ökologische Nachteile relativer Ziele	52
Abbildung 8:	Relativer Treibhauseffekt in Abhängigkeit von der Flughöhe	67
Abbildung 9:	Methode zur Berechnung von CO ₂ -Äquivalenten für die Klimawirksamkeit des internationalen Luftverkehrs.....	73
Abbildung 10:	Vorgeschlagene Verpflichtungsstruktur	77
Abbildung 11:	Wesentliche Variablen des AERO-Modellsystems.....	106
Abbildung 12:	Jährlicher Zyklus der bei vollständiger Vermeidung von Kondensstreifen zulässigen Fluglevels	124

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1:	Wirkung luftverkehrsbedingter Emissionen und ihrer Reaktionsprodukte auf den Treibhauseffekt.....	34
Tabelle 2:	Luftverkehrsbedingter Strahlungsantrieb im Jahr 1992	41
Tabelle 3:	Vergleich ausgewählter Bemessungsgrundlagen	62
Tabelle 4:	Ausgewählte NO _x -Emissionsindizes für die Berechnung der NO _x Emissionen auf Grundlage des Treibstoffverbrauchs.....	65
Tabelle 5:	Global durchschnittlicher Strahlungsantrieb des Flugverkehrs mit und ohne Auftreten von Kondensstreifen.....	68
Tabelle 6:	Datenverfügbarkeit der Parameter zur Bestimmung von Kondensstreifenindizes nach der Wahrscheinlichkeitsmethode	69
Tabelle 7:	Ableitung spezifischer Strahlungsantriebe und CO ₂ -Äquivalente für das Jahr 1992.....	72
Tabelle 8:	Exemplarische Berechnung der CO ₂ -Äquivalente zweier Flüge.....	74
Tabelle 9:	Flugkategorien in Abhängigkeit von Nationalität der Fluggesellschaft sowie des Abflugs- und Zielorts.....	78
Tabelle 10:	Zuordnung der Emissionen auf Teilnehmer- und Nicht-Teilnehmerstaaten entsprechend der Nationalität der Fluggesellschaft.....	82

Tabelle 11:	Zuordnung der Emissionen nach Abflugs- oder Zielort des Flugzeugs.....	83
Tabelle 12:	Nachweisverpflichtete im Vergleich	89
Tabelle 13:	Mögliche Caps für den Emissionshandel im internationalen Luftverkehr	103
Tabelle 14:	Übersicht über die Ausgestaltungsoptionen.....	105
Tabelle 15:	Simulationsergebnisse von NASA, ANCAT und DLR	109
Tabelle 16:	Ergebnisse der FESG Szenarien für 2050	110
Tabelle 17:	Bevölkerungs- und Wirtschaftsentwicklung in den IS92-Szenarien des IPCC.....	112
Tabelle 18:	Annahmen zur Entwicklung der Nachfrage	112
Tabelle 19:	Wesentliche Ergebnisse der EDF-Szenarien	113
Tabelle 20:	Treibstoffverbrauch und Emissionen im zivilen Luftverkehr, 1992....	114
Tabelle 21:	Auswirkungen verschiedener Zertifikatspreise bei einer Auktionierung von Emissionsrechten	117
Tabelle 22:	Auswirkungen unterschiedlicher Zuteilungsoptionen, 2010.....	118
Tabelle 23:	Änderung von Treibstoffverbrauch und Flugzeit bei Beschränkung der Flughöhe im europäischen Luftraum	122
Tabelle 24:	Auswirkung einer Flugroutenoptimierung am Beispiel ausgewählter Flugrouten bzw. Flugprofile.....	126
Tabelle 25:	Auswirkung einer Beschränkung der Reiseflughöhe, 2010	127
Tabelle 26:	Spezifische Kenndaten für Standardflugzeuge und –strecken	129
Tabelle 27:	Treibstoffmehrverbrauch in Abhängigkeit von der Reduzierung der Reiseflughöhe	130
Tabelle 28:	Klimawirksamkeit eines Flugkilometers mit Kondensstreifen und Zirruswolken	132
Tabelle 29:	Vermeidungskosten von Kondensstreifen und Zirruswolken bei einem Flug von Frankfurt nach Los Angeles.....	135
Tabelle 30:	Einfluss des Fluglevels auf die spezifischen Vermeidungskosten (Proportionalansatz)	136
Tabelle 31:	Spezifische Vermeidungskosten in Abhängigkeit von der Flugdistanz mit Kondensstreifen (Pauschalansatz).....	137
Tabelle 32:	Zusätzliche Treibstoffkosten	138
Tabelle 33:	Mehrkosten pro Passagier (Proportionalansatz)	139

Tabelle 34:	Bestimmung des Vermeidungspotenzials von Kondensstreifen und Zirruswolken	140
Tabelle 35:	Bestimmung des Vermeidungspotenzials auf Basis des Strahlungsantriebs.....	141
Tabelle 36:	Vermeidungspotenzial von Kondensstreifen und Zirruswolken	142
Tabelle 37:	CO ₂ - und NO _x -Einsparungen durch den Anbau von Winglets	147
Tabelle 38:	CO ₂ - und NO _x -Einsparungen durch den Einsatz von Riblets	148
Tabelle 39:	Vermeidungspotenziale im Überblick.....	150

Abkürzungsverzeichnis

ANCAT	Expert Group on Abatement of Noise Caused by Air Transportation
ATC/ATM	Air Traffic Control/Air Traffic Movement
BIP	Bruttoinlandsprodukt
BMVBS	Bundesministerium für Verkehr, Bauen und Wohnen
BSP	Bruttosozialprodukt
CAEP	Committee on Environmental Protection der ICAO
CCAP	Center for Clean Air Policy
CDM	Clean Development Management
CNS/ATM	Communication, Navigation, Surveillance/Air Traffic Management
COP	Conference of the Party
DETR	Department of the Environment, Transport and the Regions
DLR	Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt
DNR	Deutscher Naturschutzring
ECAC	European Civil Aviation Conference
EDF	Environmental Defence Fund
ERLIG	Emissions Related Landing Charges Investigation Group
Eurocontrol	Europäische Organisation für die Sicherheit in der Luftorganisation
FESG	Forecasting and Economic Support Group
ft	feet
GDP	Gross Domestic Product
GWP	Global Warming Potential
HSCT	High Speed Civil Transport
IATA	International Air Transport Association
ICAO	International Civil Aviation Organization

ICSA	International Coalition for Sustainable Aviation des T&E
IMO	International Maritime Organization
IPCC	Intergovernmental Panel on Climate Change
JI	Joint Implementation
KP	Kioto-Protokoll
KS	Kondensstreifen
LTO-Zyklus	Landing & Take-off-Zyklus
MTOW	Maximum Take-off Wight
MTPWW	Ministry of Transport, Public Works and Watermanagement
MZFW	Maximal Zero Fuel Weight
NASA	National aeronautics and space administration
NGO	Non governmental organization (Nichtregierungsorganisation)
nm	Nautical Mile (1 nm = 1,852 km)
OWE	Operating Wight empty
pkm	Personenkilometer
PSR	Performance standard rate
RFI	Strahlungsantriebsfaktor
RTK	Revenue Tonne Kilometre
SBSTA	Subsidiary Body for Scientific and Technical Advice der UNFCCC
T&E	Transport and Environment, Dachverband europäischer Verkehrs-NGOs
tkm	Tonnenkilometer
UNFCCC	United Nations Framework Convention on Climate Change
VCD	Verkehrsclub Deutschland
WBGU	Wissenschaftlicher Beirat Bundesregierung Globale Umweltveränderungen
ZW	Zirruswolken

1. Einleitung

Nach Schätzungen des Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) trägt der internationale Flugverkehr mit etwa 3,5% zur globalen Erwärmung bei.¹ Setzt sich das Wachstum des Flugverkehrsaufkommens fort wie in den 90er Jahren, wo der internationale Flugverkehr jährlich um 4% wuchs, so dürfte der Beitrag des internationalen Flugverkehrs am Treibhauseffekt schon 2010 höher sein als der Beitrag Deutschlands zur globalen Erwärmung.

Der internationale Flugverkehr ist also ein zunehmend wichtiger werdender Verursacher für den Treibhauseffekt und dennoch ist er gegenwärtig vom Kioto-Protokoll (KP) nicht erfasst.² Die Treibstoffe, die im internationalen Flug- und Seeverkehr verbraucht werden, die so genannten Bunker Fuels, sind von den Minderungs- und Stabilisierungsverpflichtungen für die erste Verpflichtungsperiode (2008 - 2012) ausgenommen worden, da keine Einigung in der Allokationsfrage dieser Emissionen erzielt werden konnte. Da im internationalen Flugverkehr immer mindestens zwei Staaten beteiligt sind, konnte die Allokation nicht – wie sonst im Kioto-Protokoll – nach dem Territorialprinzip erfolgen. Gleichzeitig jedoch verpflichtet das Kioto-Protokoll die Annex I-Staaten³ in Artikel 2.2 dazu, die durch Bunker Fuels verursachten Treibhausgasemissionen in Zusammenarbeit mit der International Civil Aviation Organization (ICAO) und der International Maritime Organization (IMO) zu stabilisieren oder zu reduzieren.

Gegenwärtig werden national und international diverse Politiken und Maßnahmen diskutiert, um den Verpflichtungen aus Art. 2.2 KP nachzukommen. Neben technischen Standards zur Begrenzung von Treibhausgasemissionen werden vor allem auch ökonomische Instrumente wie Steuern und Gebühren zur Internalisierung der Treibhausgasemissionen sowie freiwillige Vereinbarungen mit der Luftfahrtindustrie (Fahrzeughersteller, Fluggesellschaften) vorgeschlagen. Darüber hinaus wird auch die Einführung eines Emissionshandels⁴ für den internationalen Flugverkehr diskutiert. Dieses Instrument ist vor allem insofern von Bedeutung, als auch das Kioto-Protokoll in Artikel 17 die Etablierung eines internationalen Emissionshandels vorsieht.

Treibhausgashandel im internationalen Luftverkehr ist aber dennoch nicht unmittelbar mit dem Kioto-Protokoll kompatibel. Denn neben CO₂ tragen vor allem auch in Reise-

¹ 1990 war der Anteil des internationalen Flugverkehrs am Treibhauseffekt noch auf 2% geschätzt worden.

² Im Unterschied zum internationalen sind die Treibhausgasemissionen des nationalen Luftverkehrs im Kioto-Protokoll erfasst.

³ Im Annex I der Klimakonvention sind die westlichen Industrieländer (im wesentlichen die OECD-Staaten) und die Mittel- und Osteuropäischen Staaten sowie die Staaten der früheren Sowjetunion aufgeführt. Die individuellen Minderungsziele der Annex I-Staaten wurden im Annex B des Kioto-Protokolls fixiert.

⁴ Im angloamerikanischen Sprachraum werden Emissionshandelsysteme präziser als Cap & Trade-Systeme bezeichnet. Hierdurch wird hervorgehoben, dass der Handel mit Emissionen eine Begrenzung derselben voraussetzt.

flughöhe emittiertes NO_x , Wasserdampf, Kondensationsstreifen sowie Zirruswolken zum Treibhauseffekt bei. Hiervon ist lediglich CO_2 im Kioto-Protokoll erfasst. Der Strahlungsantrieb von CO_2 entspricht dabei aber nur gut einem Drittel (37%) des gesamten Strahlungseffekts aller klimawirkenden Emissionen des Flugverkehrs (Lee/Sausen 2000). Eine Beschränkung des Treibhausgashandels im internationalen Flugverkehr auf die CO_2 -Emissionen könnte also durchaus zu Fehlsteuerungen führen, zumal die Wirkung auf den Treibhauseffekt der nicht vom Kioto-Protokoll erfassten Emissionen – anders als CO_2 – abhängig ist von der Flughöhe und dem Entstehungsort der Emission. So führt z.B. die komplexe Wirkung der NO_x -Emissionen, die sowohl positive wie negative Treibhausgaswirkungen verursacht, zu einem unterschiedlichen Nettoeffekt je nach dem, ob das NO_x in der nördlichen oder südlichen Hemisphäre emittiert wird (Lee/Sausen 2000).

Die Einführung eines Emissionshandelssystems im internationalen Luftverkehr ist also schon aufgrund der komplexen Wirkungszusammenhänge sicherlich mit mehr Problemen und Fragen behaftet als die Einführung des Treibhausgashandels in anderen Sektoren. Und auch wenn davon auszugehen ist, dass dieser schnell wachsende Sektor als Gesamtheit mittelfristig zunächst als Nachfrager von Emissionsrechten auftritt, dürfte die Ausgestaltung eines Emissionshandelssystems hierdurch nicht einfacher werden, da einzelne Verpflichtete (z.B. Fluggesellschaften) mit rückläufigem Verkehrsaufkommen durchaus auch als Anbieter von Emissionsrechten auftreten können.

Die ICAO hat kürzlich in ihrer 33. Vollversammlung festgestellt, dass Emissionshandel langfristig eine kosteneffiziente Maßnahme zur Begrenzung der Treibhausgasemissionen ist (ICAO 2001b). Zunächst war vorgesehen, dass Emissionshandel auch als Maßnahme für die Erfüllung der Verpflichtung aus Art. 2.2 KP betrachtet werden kann. Dieser Passus wurde jedoch bei der Vollversammlung gestrichen. Kurzfristig setzt die ICAO zunächst auf freiwillige Vereinbarungen. Darüber hinaus werden die Mitglieder aufgefordert, die Entwicklung von marktbasierten Instrumenten voranzutreiben.

Auch die Kommission der Europäischen Union befürwortet die langfristige Einführung eines Treibhausgashandels für den internationalen Luftverkehr (COM (1999) 640 final).

2. Die Politikarena des internationalen Luftverkehrs

Die Bedeutung des Flugverkehrs für das globale Klima ist spätestens seit der Veröffentlichung des IPCC-Berichts „Aviation and the Global Atmosphere“ bekannt (IPCC 1999). International wird auf Ebene der Vereinten Nationen durch die Klimarahmenkonvention (UNFCCC) und die International Civil Aviation Organization (ICAO) an Konzepten zur Verminderung der Klimawirkungen gearbeitet. Am politischen Prozess sind jedoch auch Nichtregierungsorganisationen (NGOs) und die Wirtschaft durch Vertreter der Fluggesellschaften und Flugzeughersteller beteiligt.

Da aus Gründen der Effizienz und potenziellen Marktverzerrungen eine globale Lösung anzustreben ist, auf internationaler Ebene jedoch nur Kooperationslösungen möglich sind, ist die Kenntnis der politischen Akteure und ihrer Positionen im Verhandlungsprozess notwendig, wenn es um die Entwicklung eines politisch durchsetzbaren Konzeptes zur Begrenzung der Klimawirkungen des internationalen Luftverkehrs geht.

2.1 Die Klimarahmenkonvention

Auf der dritten Vertragsstaatenkonferenz zur Klimarahmenkonvention im Jahr 1997 konnte bei der Formulierung des Kioto-Protokolls keine Einigkeit über die Allokation der Emissionen aus Bunker Fuels (Emissionen aus internationalem Flug- und Schiffsverkehr) erzielt werden. Es wurden daher keine konkreten Reduktionsziele für Emissionen aus Bunker Fuels festgeschrieben. Artikel 2.2 des Kioto-Protokolls fordert aber die Annex I-Staaten (Staaten mit Reduktions- bzw. Stabilisierungszielen) auf, eine Begrenzung oder Reduktion der Treibhausgase durch Zusammenarbeit mit der ICAO und der IMO zu verfolgen.

Der wissenschaftliche und technische Beirat der Klimarahmenkonvention, der Subsidiary Body for Scientific and Technical Advice (SBSTA), arbeitet an Methoden zur Verbesserung der Berichterstattung über Emissionen aus Bunker Fuels und an Konzepten zur Integration dieser Emissionen in die nationalen Inventare für Treibhausgase.

Seit 1999 wurde die Zusammenarbeit von SBSTA, ICAO und IMO durch gegenseitige Teilnahme an Sitzungen und Informationsaustausch über Arbeitspläne und Fortschritte verbessert. Seither haben Vertreter der ICAO und der IMO auf jeder SBSTA-Sitzung über ihre Aktivitäten zu Emissionen aus dem internationalen Luft- und Schiffsverkehr informiert und die Zusammenarbeit in methodischen Fragen zur Verbesserung der Berichterstattung verstärkt (UNFCCC/SBSTA 1999).

Verbesserungsbedürftig sei laut SBSTA die Qualität der Berichterstattung der Annex I-Staaten hinsichtlich der Bunker Fuels, sowohl was die Genauigkeit als auch die Konsistenz und Vergleichbarkeit angeht. Seit Juni 2000 liegt den Vertragsstaaten der „IPCC Report on Good Practice and Uncertainty Management in National Greenhouse Gas Inventories“ (IPCC 2000) vor, der auch über die Methoden zur Schätzung der Emissionen aus Bunker Fuels informiert.

Im Rahmen der 7. Vertragsstaatenkonferenz wurden in Marrakesch im Herbst 2001 Fragen der Emissionen aus Bunker Fuels diskutiert. Vertreter der EU wiesen wiederholt auf die wachsenden Treibhausgasemissionen aus dem Luftverkehr hin und forderten zum Kioto-Protokoll kompatible Leitlinien für die Allokation.

Laut UNFCCC (2001) wurde mit dem Abschluss in Marrakesch die Grundlage für notwendige Arbeiten an der Verbesserung der Daten-Qualität und der Berichterstattung über Emissionen aus dem internationalen Transport geschaffen. In ihrem Abschlussbericht betont die UNFCCC außerdem, dass eine Annäherung der Positionen im Hinblick auf weitere Schritte nach einer korrekten Dokumentation der Emissionen nötig seien. Die USA lehnen eine Allokation der Emissionen laut Klimarahmenkonvention an die Staaten ab, ohne geeignete Alternativen zu nennen. Was den Emissionshandel betrifft, so scheint seine Einführung laut ICAO der Entwicklung eines neuen rechtlichen Rahmens zu bedürfen, so dass diese Option nicht kurzfristig in Frage kommt. Die gegenwärtige Forderung der USA, den Flugverkehr der Entwicklungsländer in die Vereinbarung einzubeziehen, wird die Entwicklung einer sinnvollen Regelung eher behindern (UNFCCC 2001).

Nach Artikel 25 des Kioto-Protokolls (Inkrafttreten) ist es möglich, die Emissionen den Vertragsstaaten zuzuordnen. Dennoch ist unklar, wie die USA beteiligt werden können, sollten sie bei ihrem jetzigen Standpunkt bleiben (UNFCCC 2001). Der Rückzug der USA vom Kioto-Protokoll verkompliziert die Frage der Allokation entscheidend. Die sich daraus ergebenden Implikationen müssen berücksichtigt werden. Im Gegensatz dazu ist die Einführung anderer operationeller oder marktorientierter Instrumente nicht abhängig von der Allokation nach der Klimarahmenkonvention. Die EU sollte daher auch diese Lösungen verfolgen (UNFCCC 2001).

2.2 International Civil Aviation Organization

Die ICAO ist die UN-Sonderorganisation für Zivilluftfahrt, gegründet 1944 durch Unterzeichnung der Chicago Convention on Civil Aviation durch damals 50 Vertragsstaaten (Chicago Convention 1944). Sie entwickelt neue Standards, die in Form rechtlich bindender Anhänge in die Chicago Convention aufgenommen werden. Ihr souveränes Gremium ist die Vollversammlung, ihr regierendes Organ der Rat, dessen 33 Mitglieder für drei Jahre von der Vollversammlung gewählt werden. Änderungen der Anhänge der Chicago Convention bedürfen einer Zweidrittelmehrheit des ICAO-Rates. In der dreijährlich stattfindenden Vollversammlung wird die gesamte Arbeit der Organisation im Detail geprüft und die Richtung für zukünftige Arbeiten der verschiedenen Organe der ICAO bestimmt. Jeder der mittlerweile 186 Vertragsstaaten ist mit einfacher Stimme zur Wahl berechtigt.

Die Umweltaktivitäten der ICAO werden zum größten Teil vom Committee on Environmental Protection (CAEP) übernommen, das sich aus Experten aus 19 Mit-

gliedsstaaten⁵ und 11 Beobachtern⁶ zusammensetzt. Das Umweltkomitee CAEP unterstützt den Rat der ICAO bei der Formulierung neuer Grundsätze und bei der Annahme neuer Standards für Lärm und Emissionen aus dem Flugverkehr. Die Standards und empfohlenen Verfahrensweisen in Fragen des Umweltschutzes sind im Anhang 16 Teil I (Fluglärm) bzw. Teil II (Emissionen) der Chicago Convention on International Civil Aviation enthalten.

Gegenwärtig ist CAEP in fünf Arbeitsgruppen und eine Support Group strukturiert. Zwei der Arbeitsgruppen befassen sich mit lärm- und drei mit emissionsbedingten Aspekten sowie marktorientierten Ansätzen zur Begrenzung oder Reduktion der Emissionen des Flugverkehrs. Die Support Group berät CAEP über ökonomische Kosten und ökologische Schäden bzw. Nutzen der diskutierten Maßnahmen.

Die Berichte des Umweltkomitees werden dem Rat zur Prüfung vorgelegt, der über das Arbeitsprogramm der CAEP entscheidet und auf Empfehlungen der CAEP unter Berücksichtigung der Air Navigation Commission und des Air Transport Committees handelt. Im Falle von Empfehlungen zur Einführung neuer Standards oder der Ergänzung bestehender Standards gibt es ein festgelegtes Vorgehen zur Beteiligung der Vertragsstaaten bis zur Entscheidung des Rates.

Etwa 3.000 bilaterale Luftverkehrsabkommen basieren auf den Grundsätzen der Beschlüsse der ICAO, die meisten schließen die Besteuerung und Erhebung von Abgaben auf Treibstoff für den internationalen Verkehr aus. Änderungen der Abkommen sind nur mit Zustimmung der beteiligten Parteien möglich. Bezüglich freiwilliger Selbstverpflichtungen und Emissionshandel gibt es in der Chicago Convention keine Anmerkungen, die ihre Einführung verbieten (ICAO/CAEP 2000).

Größere Beachtung findet die Arbeit der CAEP im Bereich der Emissionen seit der Formulierung des Kyoto-Protokolls, insbesondere durch Artikel 2.2, der die Annex I-Staaten auffordert, in Zusammenarbeit mit der ICAO Treibhausgas-Emissionen aus dem internationalen Flugverkehr zu begrenzen. CAEP erhielt daraufhin den Auftrag, politische Ansätze zur Begrenzung oder Reduktion der Treibhausgase aus dem Flugverkehr zu erarbeiten und dabei sowohl die Ergebnisse des „IPCC Special Report on Aviation and the Global Atmosphere“ (IPCC 1999) als auch die Anforderungen des Kyoto-Protokolls zu berücksichtigen.

Ende des Jahres 2000 legte CAEP einen Bericht zu marktorientierten Ansätzen wie Kerosinsteuer, Emissionsabgaben, Emissionshandel, freiwilligen Selbstverpflichtungen

⁵ Australien, Brasilien, Kanada, Ägypten, Frankreich, Deutschland, Italien, Japan, Niederlande, Polen, Russland, Singapur, Süd-Afrika, Spanien, Schweden, Schweiz, Tunesien, Großbritannien, USA.

⁶ Griechenland, Norwegen, Arab Civil Aviation Commission (ACAC), Airport Council International (ACI), Economic Commission (EC), International Air Transport Association (IATA), International Co-ordinating Council of Aerospace Industries Association (ICCAIA), International Federation of Airline Pilots' Associations (IFALPA), European Federation of Environment and Transport (T&E), United Nations Framework Convention on Climate Change (UNFCCC) and World Meteorological Organization (WMO).

sowie die Entwicklung einer Bewertungsgrundlage zur Identifizierung der Stärken und Schwächen der verschiedenen Ansätze vor (ICAO/CAEP 2000). Es handelt sich um eine umfangreiche Analyse marktorientierter Mechanismen, in der unterschiedliche Reduktionsziele und regionale Abgrenzungen sowie rechtliche und politische Rahmenbedingungen diskutiert werden.

Auf dieser Grundlage verabschiedete das Umweltkomitee ein Arbeitsprogramm (ICAO/CAEP 2001a) für die nächsten fünf bis zehn Jahre, das die Entwicklung eines offenen Emissionshandelssystems mit Pilotcharakter vorsieht. Die Koordination mit der UNFCCC soll verstärkt werden, um eine Integration des offenen Emissionshandels im Luftverkehr in das Kioto-Protokoll zu erreichen. Die Entwicklung von Zielen für Emissionen aus dem internationalen Luftverkehr und von Mechanismen zur Verteilung der Emissionsrechte soll unter Berücksichtigung der Entwicklungsländer stattfinden. Außerdem will CAEP Kernelemente eines offenen Emissionshandelssystems einschließlich Berichterstattung, Überwachung, Einhaltung und Sanktionierung entwickeln, die kompatibel mit den Kioto-Mechanismen sind.

Im Rahmen des Arbeitsprogramms wird auch die Entwicklung eines Flugeffizienzfaktors als Grundlage für eine aufkommensneutrale Abgabe aufgeführt. Abgaben sollten sich an der Höhe der Kosten zur Beseitigung der Umweltauswirkungen durch die Emissionen orientieren und zwar in dem Umfang, in dem die Wirkungen identifiziert und dem Flugverkehr eindeutig zugewiesen werden können. Für die dazu notwendige Monetarisierung der Schäden sollen Studien durchgeführt und Leitlinien zur Identifizierung der durch die Emissionen verursachten Kosten entwickelt werden. CAEP möchte darüber hinaus für die Erhebung von Abgaben und ihre Verwendung zur Minderung von Umweltauswirkungen durch den Luftverkehr detaillierte Beratung anbieten, die rechtliche und administrative Implikationen berücksichtigt.

Forschungsbedarf sieht das Umweltkomitee hinsichtlich der Auswirkungen von Maßnahmen zur Emissionsreduktion einerseits auf die Entwicklungsländer und andererseits auf den nationalen wie internationalen Flugverkehr. Untersucht werden sollen auch die Auswirkungen der Einführung verschiedener Ansätze zur Emissionsreduktion durch einzelne Staaten. Darüber hinaus sollen die Wechselwirkungen von marktorientierten Lösungen zur Reduktion von CO₂ mit Kontrollmechanismen für andere Emissionen analysiert werden, wie z. B. NO_x, Partikel oder Lärmemissionen, sowie der Nutzen von Anreizen zur Emissionsreduktion, wie z. B. „Credit for Early Action“ oder „Baseline Protection“, mit dem Ziel, Nachteile für Vorreiter im Umweltschutz auszuschließen. Alle Analysen, die bisher über die Verwendung marktorientierter Ansätze seitens der ICAO durchgeführt wurden, beziehen sich ausschließlich auf CO₂.

Zur Beteiligung und Information der nicht im CAEP-Prozess beteiligten Staaten organisierte die ICAO im April 2001 das „Colloquium on Environmental Aspects of Aviation“, an dem ca. 200 Teilnehmer aus etwa 50 Staaten und 20 internationalen Organisationen teilnahmen. Hier wurden die globalen Auswirkungen der Flugverkehrsemissionen thematisiert und verschiedene Optionen zur Begrenzung oder Reduktion der Treib-

hausgase diskutiert. Zur Erfassung von Emissionen mit globaler Wirkung wurde über eine Erweiterung des Annex 16 der Chicago Convention nachgedacht.

Die aktuellen Grundsätze der ICAO zum Umweltschutz wurden auf der 33. Vollversammlung im Herbst 2001 mit der Resolution 33-7 festgelegt (ICAO 2001a). Zur Begrenzung oder Reduktion der Umweltwirkungen von Flugzeugemissionen soll bei Empfehlungen an die Conference of the Parties to the Climate Convention (COP) besondere Betonung auf die Anwendung technischer Lösungen gelegt werden, während marktorientierte Ansätze noch geprüft werden (ICAO 2001a). Unter technischen Lösungen werden dabei einerseits Technologien und Standards verstanden, die vorwiegend auf bodennahe Emissionen abzielen und insbesondere Stickoxide betreffen. Ein CO₂-Standard ist hingegen nicht vorgesehen, da der CO₂-Ausstoß direkt mit dem Treibstoffverbrauch gekoppelt sei und dadurch ohnehin ökonomischer Druck ausgeübt werde. Außerdem werden zur Reduktion des Treibstoffverbrauchs operationelle Maßnahmen wie Air Traffic Control and Air Traffic Movement (ATC/ATM) aufgeführt.

Die Resolution enthält darüber hinaus einen Appendix zu marktorientierten Instrumenten im Flugverkehr, in dem Emissionshandel, freiwillige Selbstverpflichtungen und Emissionsabgaben thematisiert werden. Darin wurde beschlossen, dass der Rat Leitlinien für die Staaten zur Einführung von marktorientierten Maßnahmen erarbeiten soll. Dabei werden alle Beteiligten aufgerufen, Kosten und Nutzen der einzelnen Maßnahmen zu prüfen, um eine Emissionsminderung auf kosteneffizienteste Weise zu erreichen.

Grundsätzlich kommt die ICAO-Vollversammlung zu der Einschätzung, dass ein Emissionshandelssystem langfristig gesehen eine kosteneffiziente Möglichkeit zur Begrenzung oder Reduktion der CO₂-Emissionen aus dem Flugverkehr darstellt, soweit es sich um ein offenes Emissionshandelssystem handelt. Die Vollversammlung stimmte daher der Entwicklung eines Emissionshandelssystems für den internationalen Luftverkehr zu und beauftragte den Rat, Leitlinien für einen offenen Handel zu entwickeln und den Blick dabei vor allem auf die Schaffung struktureller und rechtlicher Rahmenbedingungen für die Teilnahme des Flugverkehrs an einem offenen Emissionshandelssystem zu richten.

Kurzfristig, so die Einschätzung der ICAO, könnten freiwillige Selbstverpflichtungen als erster Schritt zu zukünftigen Maßnahmen und weiteren Emissionsminderungen dienen. Die Resolution fordert daher den Rat auf, freiwillige Vereinbarungen durch die Entwicklung von Leitlinien sowie einer Vorlage zur freiwilligen Selbstverpflichtung zu erleichtern.

Zur Sprache kamen auf der 33. Vollversammlung auch emissionsabhängige Abgaben, wobei die fortdauernde Gültigkeit der Resolution von 1996 (ICAO 1996) über Umwelt-Abgaben und -Steuern bekräftigt wurde. Dort wird empfohlen, dass eine Abgabe einer Steuer vorzuziehen ist, und dass die Einnahmen in erster Linie zur Verminderung der Umweltauswirkungen des Luftverkehrs einzusetzen sind. Die Höhe der Abgabe sollte sich an den Kosten zur Beseitigung der Umweltauswirkung orientieren, und zwar in

dem Maße, in dem die Schäden identifiziert und dem Flugverkehr direkt zugewiesen werden können. Die Mitgliedsstaaten werden aufgefordert, von unilateralem Handeln bei der Einführung von Abgaben abzusehen, soweit sie inkonsistent mit der derzeitigen Resolution sind.

Nach der breiten Zustimmung zum Emissionshandel im internationalen Luftverkehr wird sich die zukünftige Arbeit von CAEP auf die Konkretisierung und Definition der Ausgestaltung des Emissionshandelssystems konzentrieren. Anstrengungen sind insbesondere bei der Definition von Reduktionszielen, der Entscheidung über den Vergäbmodus, Klärung des Verhältnisses von internationalem zu nationalem Flugverkehr und Regelung der Flüge zwischen Staaten mit und ohne Beteiligung am Emissionshandel notwendig (ICAO/CAEP 2001b).

2.3 Europäische Union

Mit der Einbeziehung klimaschutzpolitischer Ziele in sektorale Politikbereiche richtet die EU in ihrem 6. Umweltaktionsplan (Europäische Kommission 2001c) ihre Aufmerksamkeit auch auf die Emissionen der Luftfahrt. Falls innerhalb der ICAO bis 2002 keine Einigung über geeignete Maßnahmen erzielt wird, will die EU selbst Maßnahmen zur Reduzierung der Emissionen aus dem Luftverkehr einleiten.

Zum Thema „Air Transport and the Environment“ hat die Europäische Kommission im Dezember 1999 eine Mitteilung veröffentlicht (Europäische Kommission 1999), die richtungsweisend für die Arbeit der Kommission während der folgenden Jahre sein soll. Damit wurden erstmals Wege zu einer umfassenden und integrierten Politik der EU auf dem Gebiet des Luftverkehrs analysiert und identifiziert.

Die Mitteilung schlägt die Einführung von ökonomischen und regulativen Anreizen vor, um umweltfreundliche Unternehmen und Technologien, die dem Stand der Technik entsprechen, zu fördern. Die Luftfahrtindustrie wird ausdrücklich aufgefordert, z. B. mittels freiwilliger Vereinbarungen einen proaktiven Weg zur Reduktion der Umwelteinflüsse aus dem Flugbetrieb einzuschlagen. Um faire Wettbewerbsbedingungen für alle Transportmittel zu schaffen, soll auf die Internalisierung der Umweltkosten hingearbeitet werden.

Die Kommission kündigt in der Mitteilung auch an, dass sie auf Grundlage der Ergebnisse der ICAO-Vollversammlung Ende 2001 eine Neubewertung der globalen, europäischen und lokalen Maßnahmen im Hinblick auf den Vertrag von Amsterdam und das Kioto-Protokoll vornehmen und bei fehlenden Fortschritten auf internationaler Ebene oder neuen wissenschaftlichen Erkenntnissen über die Umweltauswirkungen des Flugverkehrs neue Schwerpunkte setzen wird. Mit Blick auf die Bedeutung der anstehenden Entscheidungen innerhalb der ICAO wird betont, dass die EU ihre Interessen besser vertreten sollte.

Neben Fragen des Fluglärms, der Entwicklung von Standards, operationellen Maßnahmen und der Förderung von Initiativen der Industrie widmet sich die Mitteilung ökonomischen Anreizen wie Kerosinsteuer, Umweltabgaben und Emissionshandel. Die

Mitteilung weist darauf hin, dass Überlegungen zum Emissionshandel im Kontext der Implementierung des Kioto-Protokolls stattfinden und deshalb die Erfüllung der Emissionsreduktionsziele mittels Emissionshandel vorwiegend auf Ebene der Staaten entschieden wird. In der Praxis könnte dies aufgrund verschieden hoher Reduktionsverpflichtungen der Staaten zu unterschiedlich starkem Druck auf die Luftfahrtindustrie führen und Wettbewerbsverschiebungen verursachen.

Die Mitteilung widmet sich auch den Möglichkeiten zur Implementierung eines Emissionshandelssystems auf nationaler oder regionaler Ebene. Weiterhin wird der Handel von Emissionsrechten an einzelnen Flughäfen diskutiert. Die Handelsmechanismen sollen dabei mit den Vergaberegeln für Slots kompatibel sein.

Als eine weitere Möglichkeit zur Verbesserung der globalen Umwelteinflüsse des Luftverkehrs nennt die Kommission Carbon Offsets. Es handelt sich dabei um ein System, das den Emittenten erlaubt, die Klimawirkungen der ausgestoßenen Treibhausgase durch Investitionen in Kohlenstoff-Senken auszugleichen. Aufgrund der unzureichenden wissenschaftlichen Kenntnisse über die Auswirkung solcher Maßnahmen auf die Absorption von CO₂ wird auf die Notwendigkeit weiterer wissenschaftlicher Arbeiten auf diesem Gebiet hingewiesen, bevor politische Konzepte dazu erarbeitet werden können.

Als nächsten Schritt nennt die Kommission die Fortsetzung ihrer Arbeiten zur Einführung einer Europäischen Umweltabgabe im Luftverkehr in Abstimmung mit der ICAO. Die Arbeit wird insbesondere darauf zielen, die Ebene der Abgabe festzulegen, in Kooperation mit Eurocontrol⁷ eine Methode zur Erhebung der Abgabe und Entscheidungsregeln über die Nutzung der Einnahmen zu erarbeiten, sowie Möglichkeiten von Emissionsabgaben auf der Ebene von Flughäfen zu prüfen.

Die Kommission wird weiterhin unter Berücksichtigung rechtlicher Rahmenbedingungen an innovativen Konzepten ökonomischer Instrumente wie Emissionshandel und Carbon Offsets arbeiten und diese hinsichtlich ihrer Eignung zur Lösung von Umweltproblemen im Luftverkehr prüfen. Als Zieldatum wird in dieser Mitteilung vom Dezember 1999 das Jahr 2001 genannt. Bis zur Entwicklung von politischen Konzepten in den genannten Bereichen hält die Kommission an ihrem Vorschlag zur Erhebung einer Kerosinsteuer (COM (1996) 549 -1) fest.

In einer im März 2000 veröffentlichten Mitteilung der Kommission „Taxation of Aircraft Fuel“ (Europäische Kommission 2000) werden Hintergründe und Rahmenbedingungen zur Besteuerung von Flugbenzin dargestellt.

Die Besteuerung von Mineralöl wird in der Europäischen Union durch die Rats-Direktive 92/81/EEC von 1992 geregelt. Die Mitgliedsstaaten können allerdings auch davon abweichende Regelungen treffen. Artikel 8(1)(b) der Direktive sieht die Steuerbefreiung von kommerziell genutztem Flugbenzin vor. Artikel 8(7) derselben Direktive verlangt die Überprüfung dieser Steuerbefreiung in Form eines Berichtes der Kommission, der die externen Kosten und Implikationen für die Umwelt berücksichtigt und ei-

⁷ Europäische Organisation für die Sicherheit in der Luftnavigation.

nen Vorschlag zur Abschaffung oder Modifikation der Sonderbehandlung des Flugtreibstoffes enthält. Der 1996 vorgelegte Bericht empfiehlt die Ausweitung der Mineralölsteuer auf Kerosin, sobald es die internationalen rechtlichen Rahmenbedingungen für alle Flüge, auch die aus Drittländern, erlauben.

Das Ergebnis des Berichtes spiegelt sich wieder in Artikel 13(1)(c) des Vorschlags der Kommission zur Neuregelung der Besteuerung von Energieprodukten (COM (1997) 30), der die Direktive 92/81/EEC ablösen soll. Artikel 13(2) sieht vor, dass die Mitgliedsländer nationale Flüge und Flüge zwischen Mitgliedsländern auf der Basis bilateraler Abkommen besteuern können.

Die Kommission hat auf Anfrage des Europäischen Rates eine Studie zur Besteuerung von Flugtreibstoff in Auftrag gegeben (Europäische Kommission 2000). Die Studie des Konsortiums „Resource Analysis“ (MVA/DNAL/IIAS 1998) kommt zu dem Ergebnis, dass es aus ökonomischen Gründen für die EU als Ganzes nicht praktikabel oder wünschenswert ist, eine Steuer nur für innereuropäische Flüge europäischer Fluggesellschaften zu erheben (Europäische Kommission 2000). Auch die positiven Umwelteinflüsse einer solchen Steuer sind demnach relativ gering. Der Nutzen für die Umwelt sei wesentlich höher, wenn alle Flugbewegungen von europäischen Flughäfen aus von der Steuer betroffen wären. Die Einnahmen aus der Steuer sollen nach dem Vorschlag der Kommission zur Reduktion anderer Steuern und Abgaben, insbesondere von Lohnnebenkosten, eingesetzt werden.

Auf Grundlage der Studie spricht sich die Kommission für ein verstärktes Engagement der EU-Länder innerhalb der ICAO zur Einführung einer Kerosinsteuer und anderer Maßnahmen mit vergleichbarer Wirkung aus (Europäische Kommission 2000). Auch die Umweltminister der G 8 haben sich schon 1999 für die Internalisierung der externen Kosten des Flugverkehrs durch Einführung einer internationalen Kerosinsteuer ausgesprochen und kündigten ein verstärktes Engagement in der ICAO an, das bisher noch nicht umgesetzt wurde. Der Steuersatz müsse dabei allerdings weltweit gleich hoch sein (Kirwin/Blau 1999).

Im März 2000, nach Verhandlungen der Finanz-, Verkehrs- und Umweltminister, bekundeten nur Deutschland, die Niederlande und Belgien ihre volle Unterstützung für eine EU-weite Kerosinsteuer. Spanien verlangt dagegen die Einführung der Steuer auf internationaler Ebene und fürchtet Wettbewerbsverzerrungen durch eine auf die EU beschränkte Kerosinsteuer (Kirwin 2000).

Im Vorfeld der 33. Vollversammlung der ICAO informierte die Europäische Kommission die ICAO-Mitgliedsstaaten (Europäische Kommission 2001a) über die Position der EU zu marktorientierten Instrumenten im Luftverkehr und europäische Initiativen in diesem Bereich. Darin betont die EU die Wichtigkeit der Schaffung von Anreizen zur Reduktion von Emissionen aus dem Luftverkehr und befürwortet eine Gleichbehandlung von Flugtreibstoff mit anderen Treibstoffen mit Verweis auf laufende Untersuchungen zur Einführung einer EU-weiten Abgabe.

Im gleichen Papier begrüßt die EU die Arbeit der ICAO an innovativen Konzepten umweltökonomischer Instrumente wie Emissionshandel, durch den u.U. gleiche ökologische Effekte wie bei einer Abgaben- oder Steuerlösung bei gleichzeitig niedrigeren Kosten zu erreichen wären (Europäische Kommission 2001a). Die Kommission sei durch den Europäischen Rat und die Mitgliedsstaaten aufgefordert worden, innerhalb der ICAO an der Einführung einer Kerosinsteuer oder in der Wirkung vergleichbarer Maßnahmen zu arbeiten. Innerhalb der EU werde bereits an der Schaffung rechtlicher Rahmenbedingungen zur Einführung einer innereuropäischen Kerosinsteuer gearbeitet, internationale Flüge seien aufgrund internationaler Bestimmungen bislang jedoch ausgenommen.

Die Europäische Union vertritt die Auffassung, dass bis zum Abschluss der Arbeiten innerhalb der ICAO alle Optionen, ob Kerosinsteuer oder andere Instrumente, offen bleiben sollten. Abschließend fordert die EU die 33. Vollversammlung dazu auf, den Annex I-Staaten zu ermöglichen, ihre Verpflichtungen in Hinblick auf Artikel 2.2 des Kyoto-Protokolls zu erfüllen. Ein entsprechendes Papier hat die EU zu Emissionsstandards verfasst (Europäische Kommission 2001b). Darin fordert sie die Vollversammlung der ICAO auf, die Entwicklung neuer Emissionsstandards fortzusetzen. Die Standards sollen dabei unterschiedliche Gase in allen Phasen des Fluges erfassen, also nicht nur die Start- und Landephase (den sog. LTO-Zyklus). Außerdem schlägt die EU ein Produktionsverbot („non-production rule“) vor, das alle nach 2007 produzierten Maschinen betreffen soll, die den CAEP/4 NO_x-Standard nicht erfüllen.

Im Anschluss an die 33. Vollversammlung der ICAO und im Vorfeld der COP 7 in Marrakesch betont der europäische Umweltrat die dringende Handlungsnotwendigkeit, das Wachstum der Emissionen aus dem Flugverkehr zu bremsen (RAC-France 2001). Er begrüßt die auf der 33. Vollversammlung erreichten Fortschritte und drängt CAEP, einen klaren Zeitrahmen für die Annahme der Maßnahmen durch den Rat der ICAO vorzugeben.

Wie schon im April 2001 vom Verkehrsrat beschlossen, wiederholt der Umweltrat auf einem Treffen im Oktober 2001 die Notwendigkeit der schnellstmöglichen Entwicklung von Leitlinien zu freiwilligen Selbstverpflichtungen und Emissionsabgaben unter Berücksichtigung von ökonomischen, ökologischen und wettbewerbspolitischen Aspekten. Die EU werde in allen Foren auf die notwendigen Entscheidungen hinwirken. Außerdem befürwortet der Umweltrat einen europäischen Alleingang bei der Reduktion von Treibhausgasen aus dem Luftverkehr, falls seitens der ICAO bis 2002 keine Zustimmung zu solchen Maßnahmen erteilt wird (RAC-France 2001).

Ferner strebt die europäische Zivilluftfahrt-Konferenz (European Civil Aviation Conference, ECAC) eine enge Zusammenarbeit zwischen der EU und der ICAO an. In Anlehnung an die ICAO verfolgt die ECAC für Europa das Ziel, einen sicheren und wirtschaftlichen Luftverkehr sicherzustellen, der auch der Umwelt gerecht wird. Die von der ECAC getroffenen Beschlüsse haben jedoch keine bindende Wirkung für die Mitgliedsstaaten. Innerhalb der ECAC beschäftigt sich die „Expert Group on Abatement of

Nuisances Caused by Air Transportation“ (ANCAT) als Expertengruppe mit der Verminderung luftverkehrsbedingten Umweltprobleme.

2.4 Deutsche Bundesregierung

Ein Bundestagsbeschluss vom 19. März 1997 beauftragt die Bundesregierung, die Einführung einer europaweiten Kerosinbesteuerung voranzutreiben (Kulick 2001a). Auch gibt es eine vergleichbare Festlegung in der Koalitionsvereinbarung von 1998. Dort ist auch die Rede vom generellen Abbau von Flugsубventionen wie der Mehrwertsteuerbefreiung im grenzüberschreitenden Flugverkehr. In der Koalitionsvereinbarung des Jahres 2002 wurde vereinbart, sich für eine Kerosinsteuer auf europäischer Ebene und für die Einführung von streckenbezogenen Emissionsabgaben einzusetzen. Daneben sollen in Deutschland emissionsbezogene Landegebühren eingeführt und die Befreiung von der Zahlung von Mehrwertsteuer von grenzüberschreitenden Flügen ins EU-Ausland aufgehoben werden.

Bündnis 90/ Die Grünen haben schon im Jahr 2000 einen „Vorschlag für eine europaweite Flugverkehrsabgabe“ formuliert, die wie eine Kerosinsteuer wirkt, rechtlich aber leichter umzusetzen ist, weil sie bilaterale Abkommen nicht berührt (Kulick 2001b). Die Abgabe soll auf die Gesamtemissionsmenge aller Flüge berechnet werden und bei Start und Landung von EU-Flughäfen erhoben werden. Vorgeschlagen werden zunächst 0,025 bis 0,075 € pro Liter Kerosin. Aufschläge sollen spezifisch nach Flugzeugtyp, Flugroute und -höhe berechnet werden. Damit soll ein Anreiz geschaffen werden, umweltfreundlicher zu fliegen bzw. schadstoffärmere Flugzeuge zu entwickeln. Durch die Einführung der Abgabe sollen die Emissionen im Vergleich zur Trendentwicklung um 25 - 50% reduziert werden (Kulick 2001b).

Das Bundesministerium für Verkehr, Bauen und Wohnen (BMVBW) entwickelt derzeit eine Methodik für die Einführung emissionsdifferenzierter Landeentgelte auf Basis der Ergebnisse einer ANCAT-Unterarbeitsgruppe (ERLIG, Emissions Related Landing Charges Investigation Group).

Die Enquete-Kommission Globale Weltwirtschaft empfiehlt die Begrenzung der Emissionen aus dem Luftverkehr auf eine Halbierung des Wachstums gegenüber der Trendentwicklung bis 2012 (Enquete Kommission 2002). Als politisches Instrument schlägt sie eine emissionsabhängige Abgabe vor, die mindestens EU-weit gelten sollte. Alternativ könne ein offenes Emissionshandelssystem eingerichtet werden, das mit dem Kyoto-Protokoll kompatibel ist. Dabei sollten nach Möglichkeit nicht nur CO₂, sondern alle klimarelevanten Emissionen des Luftverkehrs berücksichtigt werden. Das gelte insbesondere für die zweite Verpflichtungsperiode. Darüber hinaus solle die ICAO die geltenden NO_x-Standards verschärfen. Auf den Einsatz von zivilen Überschallflugzeugen soll aufgrund ihrer ungleich höheren Klimaschädlichkeit verzichtet werden.

Des Weiteren unterstützt die Enquete Kommission den Vorschlag des WBGU für die Einführung von Entgelten für die Nutzung globaler Gemeinschaftsgüter (WBGU 2002).

Zudem solle die Verbraucherinformation gestärkt werden, indem auf Flugtickets die Klimawirkung des jeweiligen Fluges abgebildet wird.

2.5 Nichtregierungsorganisationen

Umweltverbände und Nichtregierungsorganisationen (NGOs) drängen seit langem darauf, die direkten und indirekten Subventionen im Luftverkehr und die dadurch entstandenen Wettbewerbsverzerrungen zwischen den verschiedenen Verkehrsträger zu korrigieren sowie die Internalisierung der externen Kosten des Flugverkehrs anzugehen (DNR 2001).

Umweltverbände wie Transport and Environment, aber auch die im Deutschen Arbeitskreis Flugverkehr zusammengeschlossenen Umweltverbände (Deutscher Naturschutzring (DNR), Verkehrsclub Deutschland (VCD), Germanwatch, Bundesvereinigung gegen Fluglärm, Robin Wood) fordern europäische Initiativen und notfalls Alleingänge der EU zum Umweltschutz im Luftverkehr. Die Europäische Kommission solle zügig einen Richtlinienvorschlag zur Einführung einer europäischen Emissionsabgabe im Luftverkehr vorlegen. Auch das Europäische Parlament, der EU-Umweltrat, die EU-Verkehrsminister haben dies bereits gefordert (DNR 2001).

2.5.1 Transport and Environment und International Coalition for Sustainable Aviation

Transport and Environment (T&E), der Dachverband europäischer Verkehrs-NGOs, koordiniert im Rahmen der UN-Klimaverhandlungen die weltweit in diesem Bereich tätigen NGOs und hat bei der CAEP Beobachterstatus (Treber 1999). In dieser Funktion hat T&E ein Positionspapier zu marktorientierten Ansätzen vorgelegt und folgende Empfehlungen gemacht (T&E 2001):

- Die ICAO soll in Übereinstimmung mit dem Kioto-Protokoll (5% unter den Stand von 1990) ein CO₂-Ziel für den ersten Verpflichtungszeitraum definieren.
- Die ICAO soll ferner eine zweistufige Einführung von marktorientierten Mechanismen zur Reduktion der CO₂-Emissionen ermöglichen:
 1. Eine Emissionsabgabe sowohl für die Start- und Landephase (LTO-Zyklus) als auch für die Flugphase (Cruise-Zyklus), Einführung spätestens durch die 34. Versammlung 2004.
 2. Erreichen des Reduktionsziels von 5% (Bezugsjahr 1990) entweder durch Fortführung der Abgabe und/oder durch die Einführung eines offenen Emissionshandelssystems, das mit der ersten Verpflichtungsperiode 2008 beginnen soll.
- Zur Kontrolle aller anderen Treibhausgasemissionen der Luftfahrt soll die ICAO sowohl einen NO_x-Standard für die Flugphase einführen als auch marktorientierte Mechanismen entwickeln und dafür ggf. eine Gewichtung der CO₂-Emissionen vornehmen, um das gesamte Treibhauspotential des Sektors zu erfassen.

- Die ICAO sollte die COP 7 darüber informieren, auf welche Weise und um welchen Betrag die Emissionen reduziert werden. Sollte während der 33. Vollversammlung keine angemessene Lösung erreicht werden, so soll die COP 7 über die Allokation entscheiden und einen Plan dazu vorlegen.

Diese Forderungen richtet die Direktorin von T&E in einem Brief vom 15. Februar 2001 (T&E 2001) auch an die 15 Umweltminister der EU. Darin wird die Notwendigkeit eines europäischen Engagements für eine globale Lösung betont.

Die Verfasser des Briefs sind allerdings nach einer Bewertung des ICAO-Prozesses zu dem Schluss gekommen, dass bei einer globalen Lösung nicht ausreichend große Schritte unternommen würden, um den Luftverkehr in absehbarer Zukunft zu einem ökologisch nachhaltigen Sektor umzubauen. Zur Beschleunigung der Entwicklungen in der ICAO und der UNFCCC wird daher an die Umweltminister appelliert, die COP aufzufordern, eine Entscheidung zur Lösung der Allokationsfrage zu treffen und die Emissionen aus der internationalen Luftfahrt in die Emissionsinventare der Vertragsstaaten aufzunehmen. Außerdem werden die Umweltminister aufgefordert, die Europäische Kommission in ihrer Position innerhalb der ICAO/CAEP aktiv zu unterstützen, besonders hinsichtlich der Einführung eines weltweiten Abgabensystems. Eine Abgabe sei administrativ und politisch einfach einzuführen und umzusetzen.

Zusätzlich wird an die Umweltminister appelliert, sich auf europäischer Ebene mit den Verkehrs- und Finanzministern, deren Verantwortung ebenfalls in dieses Feld hineinreicht, in Verbindung zu setzen und Maßnahmen zur Einführung einer Umweltabgabe für den Luftverkehr einzuleiten. Außerdem sollen sie die Kommission auffordern, bis Ende 2001 einen Vorschlag zur Einführung einer europäischen Umweltabgabe für den Luftverkehr vorzulegen, der 2002 wirksam werden soll.

Die International Coalition for Sustainable Aviation (T&E ICSA Project) wurde 1998 gegründet, um die Rolle einer NGO mit Beobachterstatus im Umweltkomitee der ICAO einzunehmen. Diese Beobachterrolle nimmt T&E seit 1999 stellvertretend wahr.

ICSA ist ein internationales Netzwerk von Umwelt-NGOs aus den Bereichen Luftverunreinigung, Klimawandel und Fluglärm. In einem Positionspapier von 2000 (ICSA 2000) übt die ICSA Kritik am ICAO-Prozess in folgenden Punkten:

- CAEP konzentrierte sich vornehmlich auf marktorientierte Ansätze anstatt alle denkbaren Maßnahmen zur Erreichung der Umweltziele einzubeziehen wie z.B. Politiken und Maßnahmen zur Förderung des Verkehrsträgerwechsels.
- Die marktorientierten Instrumente beziehen sich lediglich auf CO₂-Emissionen. Die Emissionen des Luftverkehrs entfalten aufgrund der Flughöhe jedoch eine dreifach stärkere Wirkung als die des Kohlendioxids alleine.
- Es ist unwahrscheinlich, dass die ICAO Maßnahmen billigen wird, die global Anwendung finden. Vielmehr wird sie sich während des ersten Verpflichtungszeitraums (2008 - 2012) auf die Industrieländer beschränken.
- Die Allokationsfrage internationaler Emissionen ist weiterhin offen, so dass die einzelnen Länder keine klare Verantwortung für ihren Beitrag haben.

2.5.2 Center for Clean Air Policy

Das Center for Clean Air Policy (CCAP) mit Sitz in Washington D.C. wurde 1985 von progressiven Gouverneuren der USA zur Entwicklung marktorientierter Ansätze zur Reduzierung des sauren Regens gegründet. Mittlerweile arbeitet CCAP auch an marktorientierten Lösungen zur Reduktion von Ozon, Treibhausgasen und toxischen Luftschadstoffen. Als Teil von ICSA nimmt CCAP aktiv an den Klimaverhandlungen teil und ist anerkannter Vorreiter in der Anwendung flexibler Mechanismen zur Reduktion von Treibhausgasen. Gegenwärtig arbeitet CCAP an verschiedenen Optionen zur Erfassung der Emissionen aus dem Flugverkehr durch Emissionshandel und andere flexible Mechanismen.

Im Rahmen des Projektes „Policy Options for Reducing Aviation Emissions“ arbeitet CCAP auch auf internationaler Ebene an kosteneffizienten Maßnahmen zur Erfassung von CO₂ und Stickoxiden aus dem Luftverkehr. In diesem Zusammenhang analysiert CCAP auch Reduktionspotentiale durch Emissionshandel im Bereich von Flughäfen.

CCAP ist – als Teil von ICSA – offizieller Beobachter des CAEP. Dort hat CCAP der zuständigen Arbeitsgruppe Vorschläge unterbreitet und strebt eine enge Zusammenarbeit sowohl mit der ICAO als auch mit den NGOs und der Industrie an, um ein Programm zur Emissionsreduktion voranzubringen.

2.5.3 Germanwatch

Die u. a. im Klimaschutz engagierte Nord-Süd-Initiative Germanwatch beurteilt die Ergebnisse der 33. Vollversammlung der ICAO als unbefriedigend. Insbesondere wird der fehlende Bezug zum Kioto-Protokoll und das Fehlen zeitlicher Vorgaben für weitere Schritte des Klimaschutzes im Luftverkehrssektor kritisiert (Treber 2001). Des Weiteren weist Germanwatch darauf hin, dass zu den Verhandlungen der ICAO meist Vertreter der Verkehrsministerien entsendet werden, die weniger Bezug zu Klimathemen hätten als Vertreter aus den Umweltministerien, die ihrerseits an den UNFCCC-Verhandlungen teilnehmen (Treber 1999).

Die Resolution ermögliche aber einen Alleingang der EU bei Emissionsabgaben, soweit die Vorgaben durch die Resolution des ICAO-Rates zu Steuern und Abgaben von 1996 (ICAO 1996) berücksichtigt werden.

Laut einer Presseerklärung vom 25. September 2001 unterstützt Manfred Treber, Klima- und Verkehrsreferent von Germanwatch, die Position der EU im Bereich Luftverkehr. Eine europaweite Abgabe auf Flugverkehrsemissionen könne sehr gut mit der Klimaverträglichkeit der Emissionen gekoppelt werden und sei mit internationalem Recht vereinbar. Auf diese Weise könnten sogar die klimaschädlichen Emissionsbestandteile wie Stickoxide und Kondensstreifen berücksichtigt werden, die im Kioto-Protokoll keine Erwähnung finden (Germanwatch 2001).

2.6 Akteure der Wirtschaft: Fluggesellschaften und Flugzeughersteller

Der internationale Verband der Fluggesellschaften (International Air Transport Association, IATA) befürchtet nationale Alleingänge, durch die bei schlechter Koordination unterschiedliche Standards entstehen könnten. Trotz der hohen Wachstumsraten agieren Fluggesellschaften in einem hoch kompetitiven Markt, der für Vorreiter und Alleingänge wenig Raum lässt (Treber 1999).

Die IATA betont, dass in den letzten 10 Jahren die Treibstoffeffizienz um 17% gesteigert werden konnte und erwartet eine Steigerung um weitere 10% bis 2010 (Cowe 2001). Damit seien die Flugzeuge heute bezogen auf Personenkilometer um 65% effizienter als 1970. Andere Quellen nennen für diesen Zeitraum allerdings geringere Effizienzsteigerungen. Nach Aussagen der IATA werde Treibstoffverschwendung vor allem durch mangelhaftes Flugmanagement (Flugsicherung und Staus) verursacht, weil die Flugzeuge dadurch länger in der Luft bleiben müssten. Eine Verbesserung sei hier jedoch nicht durch die Fluggesellschaften möglich, sondern läge in der Verantwortung der Regierungen (Cowe 2001).

Eine Wachstumsbegrenzung des Flugverkehrs durch Steuern oder Abgaben lehnt die IATA aufgrund der wachsenden Nachfrage und vielerorts fehlender Alternativen weitgehend ab. Sie setzt vor allem auf Effizienzverbesserung des Systems durch operationelle Maßnahmen bzw. auf die Effizienzsteigerungen beim Treibstoffverbrauch und hat dazu 1999 eine Studie in Auftrag gegeben (Dobbie 1999). Durch CNS/ATM⁸ könnte eine Verringerung des Treibstoffverbrauchs um 8 bis 18% erreicht werden. Durch Optimierung von Gewicht, Auslastung und Fluggeschwindigkeit etc. seien laut IPCC (1999) ebenfalls Einsparungen um 2 bis 6% möglich.

Freiwillige Selbstverpflichtungen der Fluggesellschaften werden dagegen befürwortet. Einige Fluggesellschaften haben bereits Effizienzziele zum Treibstoffverbrauch formuliert. British Airways hat sich bis 2010 eine Verbesserung der Treibstoffeffizienz um 30% zum Ziel gesetzt (BA 2001b). Auch die IATA hat die Einführung freiwilliger produktivitätsbezogener Ziele zur CO₂-Kontrolle angekündigt (Dobbie 1999).

Die größte Fluggesellschaft British Airways weist in der Stellungnahme „British Airways and Climate Change: Our Views“ (BA 2001a) auf weiteren Forschungsbedarf hinsichtlich der Ausbreitung und Wirkung von NO_x und Wasserdampf hin. Für die Allokation der Emissionen des Luftverkehrs wird in der Stellungnahme ein internationales Inventar favorisiert, da es notwendige Kontrollmaßnahmen erleichtere.

Kerosinsteuern werden als nicht kosteneffizient abgelehnt. Hugh Somerville, Chef der Umweltabteilung bei British Airways, hält sie sogar für ökologisch unwirksam (Somerville 2001). Ein offenes Emissionshandelssystem auf internationaler Ebene hingegen

⁸ Mit der Bezeichnung CNS/ATM (Communication, Navigation, Surveillance/Air Traffic Management) werden die einzelnen Elemente und die Funktionsweise eines zukünftigen Flugsicherungssystems beschrieben.

erfülle bei voller ökologischer Wirksamkeit das Kriterium der Kosteneffizienz. Möglich sei auch die Integration der flexiblen Mechanismen Joint Implementation und Clean Development Mechanism.

Die Fluggesellschaft befürwortet das britische Emissionshandelssystem und hat dazu eine Studie des Institute of Public Policy Research finanziert, die zu dem Ergebnis kam, dass Emissionshandel für den Flugverkehr die beste Option sei (BA 2001b).

Somerville (2001) räumt ein, dass die hohen Emissionen des Luftverkehrs nicht ausschließlich durch Verbesserungen reduziert werden können. Es müsse an der Identifizierung der externen Kosten des Luftverkehrs gearbeitet werden. Zu entwickeln sei daher ein Maßnahmenpaket bestehend aus einer Kombination von Emissionshandel, freiwilligen Maßnahmen und veränderter Gebührenregelung. Parallel dazu sollten die Flugzeughersteller eine Verbesserung der Treibstoffeffizienz vorantreiben, die bis zum Jahr 2050 Treibstoffeinsparungen von 40 bis 50% ermögliche. Durch operationelle Maßnahmen seien dagegen nur relativ geringe Verbesserungen von 6 bis 12% möglich, die vor allem durch Verbesserungen des Air Traffic Control and Air Traffic Movement Systems (ATC/ATM) erreicht werden (BA 2001b).

Langfristige Alternativen wie Wasserstoff, Methan oder Biomasse werden zwar als technisch machbar bezeichnet, als kurz- oder mittelfristige Optionen jedoch nicht in Erwägung gezogen (BA 2001b).

Die Lufthansa hat eine moderne Flugzeugflotte und somit relativ effizientes Fluggerät. Wegen der Mitgliedschaft in der Star Alliance ist jedoch der Spielraum eingeschränkt, sich für klimaschonendere Rahmenbedingungen einzusetzen (Treber 1999).

Flugzeug- und Triebwerkshersteller wie Airbus und Boeing sollten ein Interesse an der forcierten Einführung treibstoffsparender Flugzeuge haben, da dies ihren Absatz steigert. Tatsächlich ist jedoch kein verstärktes Engagement auf diesem Gebiet zu beobachten.

Einzelne Triebwerkshersteller (z.B. SNECMA) haben Triebwerke entwickelt, die deutlich weniger klimaschädlich sind, jedoch vom Markt aufgrund der Rahmenbedingungen noch nicht nachgefragt werden (Treber 1999).

2.7 Politische Rahmenbedingungen für die Einführung eines Emissionshandelssystems

Die Ausgangslage für die Einführung eines Emissionshandelssystems ist recht komplex. Viele der relevanten Akteure erkennen den steigenden Beitrag des Luftverkehrs zum Treibhauseffekt und zur Umweltbelastung und sehen die Notwendigkeit, Maßnahmen zur Reduzierung der Umwelt- und Treibhausgaswirkungen des Luftverkehrs zu ergreifen.

Am weitesten reichen die Forderungen der Umwelt-NGOs. Sie fordern ein dem Kioto-Protokoll vergleichbares CO₂-Reduktionsziel für den internationalen Luftverkehr, die Einführung marktorientierter Mechanismen (Steuern oder Emissionshandel), bei denen

alle Treibhausgase des Luftverkehrs erfasst werden sowie die Flankierung dieser Instrumente durch die Festlegung von weit gehenden, verbindlichen Standards (NO_x).

Die Akteure der Luftfahrtindustrie weisen im Gegenzug darauf hin, dass die spezifischen Emissionen in der Vergangenheit erheblich reduziert werden konnten und auch in Zukunft weitere Effizienzsteigerungen zu erwarten sind. Sie erkennen jedoch an, dass hierdurch allein die steigenden Emissionen des Luftverkehrs nicht reduziert oder begrenzt werden können. Eine Wachstumsbegrenzung durch Steuern oder Abgaben lehnen sie jedoch ab und plädieren eher für freiwillige Vereinbarungen oder einen offenen Emissionshandel, bei dem der Luftverkehrssektor Emissionsrechte aus anderen Sektoren erwerben kann.

Auch in der EU und der Bundesregierung wird die Notwendigkeit und Dringlichkeit von Maßnahmen im Luftverkehr seit langem erkannt. In der EU wird z.B. die Einführung einer EU-weiten Besteuerung von Kerosin diskutiert, was von der Bundesregierung befürwortet, aber von anderen Mitgliedsstaaten (z.B. Spanien) abgelehnt wird, weil dies zu internationalen Wettbewerbsverzerrungen führen könnte. Für die Vorbereitung der 33. ICAO-Vollversammlung wurde eine EU-Position erarbeitet, in der auch die Einführung eines Emissionshandels im Luftverkehr befürwortet wird.

Bei der ICAO wird das Thema Emissionshandel im Zusammenhang mit anderen marktwirtschaftlichen Instrumenten betrachtet. Die Diskussionen hierüber werden im Committee on Aviation Environmental Protection geführt, welches zuletzt von der Vollversammlung beauftragt wurde, Kernelemente eines offenen Emissionshandelssystems einschließlich Berichterstattung, Überwachung, Einhaltung und Sanktionierung zu entwickeln, die kompatibel mit den Kioto-Mechanismen sind.

Trotz dieser verschiedenen – zum Teil divergierenden – Interessenlagen stehen nahezu alle Akteure einem mit dem Kioto-Protokoll kompatiblen Emissionshandelssystem grundsätzlich offen gegenüber. Was derzeit fehlt, ist eine detailliertere Vorstellung darüber, wie ein solches System aussehen und wie es mit dem Emissionshandel unter dem Kioto-Protokoll verknüpft werden könnte.

3. Die klimarelevanten Emissionen des Luftverkehrs

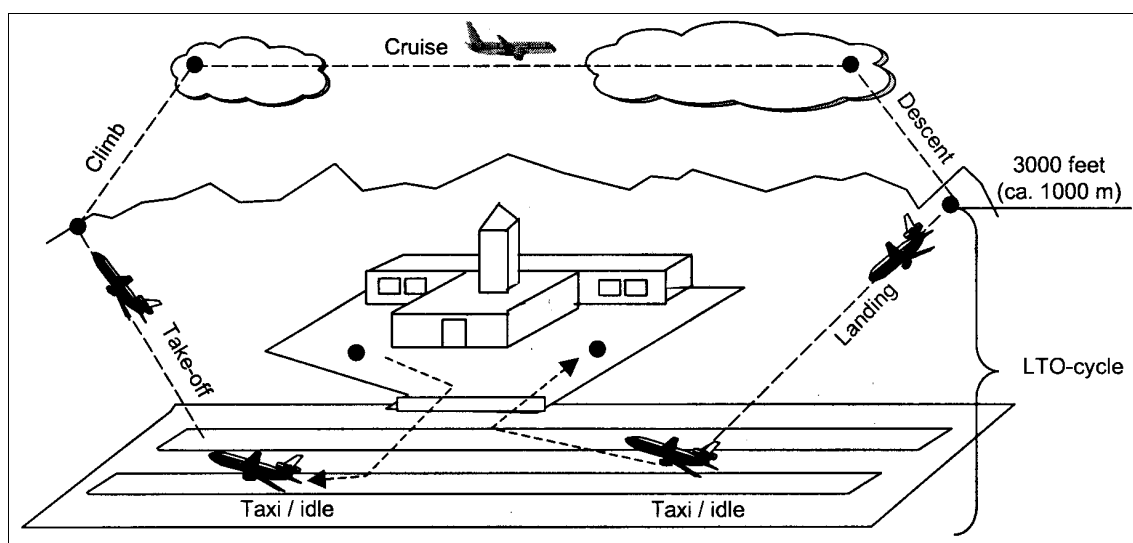
Durch den Luftverkehr werden Emissionen in die globale Atmosphäre ausgestoßen, die zum Klimawandel und zur Zerstörung der Ozonschicht beitragen. Die Emissionen und ausgestoßenen Partikel verändern die Konzentration an Treibhausgasen – Kohlendioxid (CO_2), Ozon (O_3) und Methan (CH_4). Des Weiteren lösen sie die Bildung von Kondensstreifen aus und können das Auftreten von Zirruswolken unterstützen – all dies trägt zum Klimawandel bei (IPCC 1999).

Die besondere Herausforderung für die Entwicklung eines Emissionshandelssystems besteht darin, dass die Wirkungszusammenhänge sowie der Treibhauseffekt der luftverkehrsbedingten Emissionen sehr komplex sind und von zahlreichen exogenen physikalischen und chemischen Faktoren (wie Temperatur, chemische Zusammensetzung der Atmosphäre) abhängen. Nach einer einführenden Beschreibung des Luftverkehrs sollen in diesem Kapitel die Wirkungszusammenhänge nicht nur qualitativ, sondern auch quantitativ beschrieben werden, damit darauf aufbauend eine angemessene Bemessungsgrundlage für ein Emissionshandelssystem ermittelt werden kann.

3.1 Entstehungsort der Emissionen im Luftverkehr

Im Luftverkehr wird im Zusammenhang mit dem Treibstoffverbrauch und den Emissionen in der Regel eine Unterteilung nach bodennahem Bereich bzw. dem Landing & Take-off-Zyklus (LTO-Zyklus bis 3.000 ft bzw. 915 m), dem Steig- und Sinkflug (Climb und Descent) sowie nach Reiseflugbereich (Cruise) vorgenommen. In Abbildung 1 werden die verschiedenen Flugphasen dargestellt.

Abbildung 1: Flugphasen



Quelle: AEIG 2001a

Während des Reiseflugs sowie am Ende der Climb- und am Anfang der Descent-Phase befindet sich ein Flugzeug des internationalen Flugverkehrs zum überwiegenden Teil in Höhen zwischen 9 und 12 km über dem Meeresspiegel. Lediglich Überschallflugzeuge fliegen in der Höhe von ca. 17 bis 20 km.⁹

Die Emissionen der Unterschallflugzeuge wirken zum überwiegenden Teil auf die obere Troposphäre, die der Überschallflugzeuge auf die untere Stratosphäre ein. Die zwischen den beiden Sphären liegende Tropopause, eine dünne Grenzschicht, ist ebenfalls stark beeinflusst. Insbesondere die Ozonchemie reagiert empfindlicher auf anthropogene Emissionen in diesen Sphären als im bodennahen Bereich. Dies ist auf langsamere Vermischungsprozesse, niedrigere Temperaturen und geringere Hintergrundverunreinigungen durch andere Quellen zurückzuführen (Schumann 2000a). Die Höhe der Tropopause hängt von der geographischen Breite, der Jahreszeit und dem aktuellen Wettergeschehen ab. Sie liegt am Äquator ungefähr in einer Höhe von 16 km und an den Polen in etwa 8 km Höhe (Schmidt 1994).

Je nach Sphäre unterscheidet sich die chemische Zusammensetzung der Atmosphäre. Da diese einen entscheidenden Einfluss auf die Wirkung der Emissionen des Luftverkehrs hat, spielt der Entstehungsort der Emission in Bezug auf ihren Treibhauseffekt eine große Rolle. Eine Differenzierung nach Flughöhe und nach geographischer Breite ist für die Wirkungsanalyse von grundlegender Bedeutung.

3.2 Auswirkungen des Luftverkehrs auf den Treibhauseffekt

Klimawandel durch den Luftverkehr kann grundsätzlich auf drei Prozesstypen zurückgeführt werden (IPCC 1999):

- Direkte Emissionen einer strahlungsaktiven Substanz (Kohlendioxid und Wasserdampf),
- Emissionen einer chemischen Substanz, die strahlungsaktive Substanzen bildet oder abbaut (Stickoxide),
- Emissionen, die die Bildung von Aerosolen verstärken oder zu einer Veränderung der natürlichen Wolkenbildung führen (Partikel und Wasserdampf).

Im folgenden werden die Wirkungen der einzelnen Emissionen des Luftverkehrs im Reiseflug auf den Treibhauseffekt dargestellt und die entsprechenden Wirkungszusammenhänge erläutert. Die Analyse der Auswirkungen auf den Treibhauseffekt wird auf die Wirkungen der Unterschallflugzeuge fokussiert, die der Überschallflugzeuge werden nur am Rande erwähnt.

⁹ Im Jahr 1996 waren 13 Überschallflugzeuge im internationalen zivilen Flugverkehr im Einsatz (UNFCCC/SBSTA/1996/9/Add.2). British Airways und Air France haben als Betreiber dieser Flugzeuge angekündigt (British Airways, 10.04.2003), dass sie den Flugbetrieb Ende Oktober 2003 „aus wirtschaftlichen Gründen“ einstellen werden.

Kohlendioxid ist das bedeutendste Treibhausgas, das die Wärmeabstrahlung der Erde in den Weltraum verhindert. Es hat eine lange Verweilzeit in der Atmosphäre, in der Größenordnung von hundert Jahren. Dies hat zur Konsequenz, dass sich Kohlendioxid akkumuliert und eine globale Wirkung entfaltet.

Bezüglich des Treibhauseffektes muss keine Differenzierung zwischen dem im Luftverkehr emittierten und anderen anthropogenen Kohlendioxidemissionen gemacht werden (IPCC 1999, S. 202), die Wirkung des langlebigen Kohlendioxids ist unabhängig vom Entstehungsort der Emission. Die Wirkung von Kohlendioxid auf den Treibhauseffekt nimmt mit steigender Emission stetig zu. Eine Verdoppelung der atmosphärischen Konzentrationen führt, abgesehen von einem geringen Sättigungseffekt, zu einer doppelten Treibhauswirkung (Brockhagen/Lienemeyer 1999). Die Wirkung insgesamt kann im Vergleich zu vielen anderen Emissionen des Luftverkehrs gut beschrieben werden (Tsai et al. 2000).

Wasserdampf ist ebenso wie Kohlendioxid ein direktes Produkt des Verbrennungsprozesses von Treibstoff. Er wird von Unterschallflugzeugen überwiegend in der Troposphäre emittiert und dort relativ schnell, innerhalb von ein bis zwei Wochen, durch Niederschlag ausgewaschen. Der geringe Teil des Wasserdampfes, der in die untere Stratosphäre emittiert wird, insbesondere durch Überschallflugzeuge, kann sich dort zu größeren Wasserdampfkonzentrationen verdichten und zum Ozonabbau beitragen. Da es sich bei Wasserdampf um ein Treibhausgas handelt, verstärkt die erhöhte Konzentration den Treibhauseffekt. Darüber hinaus kann durch Wasserdampf die Bildung von Kondensstreifen und Zirruswolken unterstützt werden. Bei Überschallflugzeugen stellt vermutlich die Störung des Wasserhaushaltes in der unteren Stratosphäre das gravierendste Problem für den Treibhauseffekt dar. Insgesamt sind allerdings die chemischen Zusammenhänge noch nicht hinreichend erforscht (IPCC 1999, S.188).

Kondensstreifen bilden sich in einer ausreichend kalten Luft durch die warmen und feuchten Wasserdampfemissionen des Luftverkehrs. Durch die Erhöhung der relativen Feuchte der kälteren Umgebungsluft entstehen Eiskristalle, die als linienförmige Wolken sichtbar werden. In trockener Luft verdunsten Eispartikel schnell und Kondensstreifen bleiben nur kurz bestehen. Ihr Beitrag zur Klimaerwärmung ist gering. Wenn die Umgebungsluft jedoch eisgesättigt und sehr feucht ist, können Kondensstreifen bestehen bleiben und sich ausbreiten (Schumann 2000a). Haben sie durch konvektive Vorgänge ihre charakteristische Linienform verloren, so sind sie nicht mehr von Zirruswolken zu unterscheiden. Dauerhafte Kondensstreifen reduzieren sowohl die Sonneneinstrahlung auf die Erdoberfläche als auch die Menge der langwelligen Strahlung von der Erde in den Weltraum. Im Durchschnitt erhöhen sie jedoch den Treibhauseffekt, insbe-

sondere während der Nacht und über warmen und hellen Oberflächen.¹⁰ Die Strahlungseffekte von Kondensstreifen hängen von der Flächenbedeckung und von ihren optischen Eigenschaften ab, beides ist jedoch nur unzureichend untersucht (Schumann 2000a).

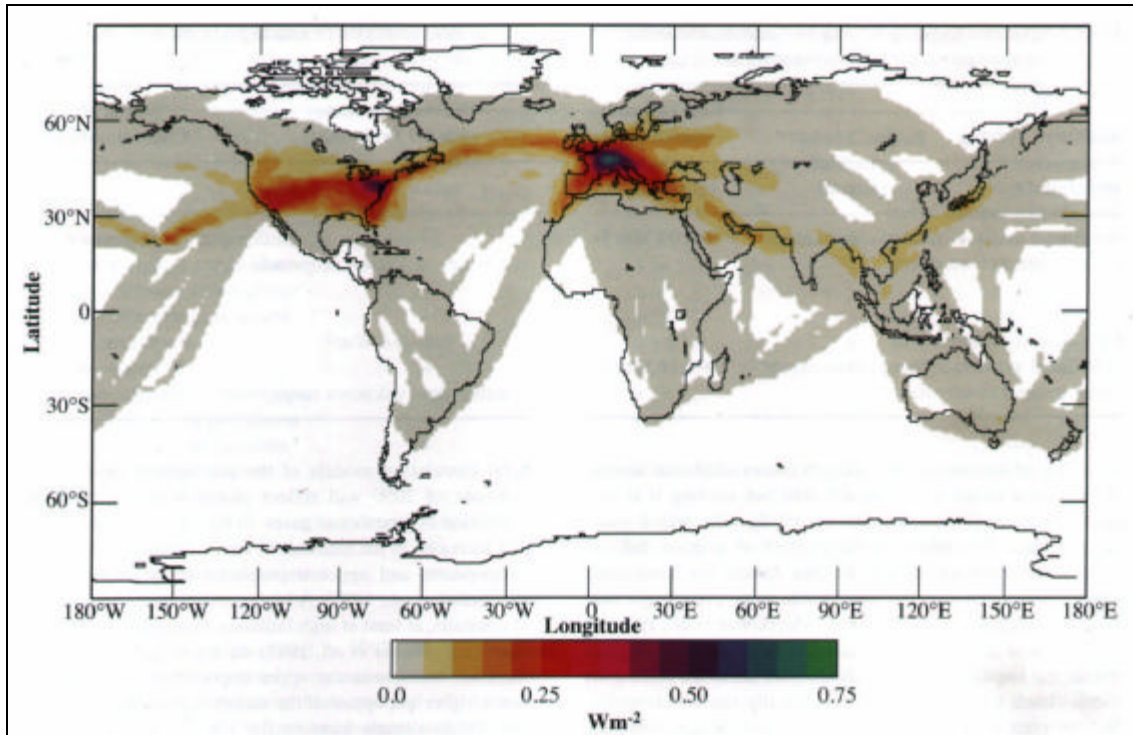
Notwendige Voraussetzung für die Formation von Kondensstreifen ist das Vorhandensein von Kondensationskeimen in Form von Partikeln, die die Wassertropfenbildung ermöglichen (EPA 2000). Modellierungen haben aber gezeigt, dass sich Kondensstreifen auch ohne luftverkehrsbedingte Ruß- und Sulfatemissionen bilden, die Hintergrundkonzentration an Partikeln in der Tropo- und Stratosphäre allein kann ausreichend sein (IPCC 1999, S.111). Allerdings weisen die durch luftverkehrsbedingte Ruß- und Sulfatemissionen ausgelösten Kondensstreifen aufgrund ihrer optischen Eigenschaften durchschnittlich eine höhere Klimawirksamkeit auf. Die Mechanismen, die zur Bildung von Kondensstreifen führen, sind insgesamt sehr komplex. Dennoch kann die Bildung von Kondensstreifen für gegebene atmosphärische Temperaturen und Feuchtigkeitsbedingungen genau vorausgesagt werden (IPCC 1999), die Abschätzung ihrer Klimawirksamkeit ist jedoch mit großen Unsicherheiten belastet.

In eisgesättigten Luftschichten kann die Entwicklung **extensiver Zirruswolken** aus dauerhaften Kondensstreifen beobachtet werden. Die Eispartikel wachsen durch Aufnahme von Wasserdampf aus der Umgebung. Darüber hinaus wird nach den neuesten wissenschaftlichen Erkenntnissen aus dem so genannten TRADEOFF-Projekt vermutet, dass luftverkehrsbedingte Aerosole als Kristallisationskeime für die Bildung von Zirruswolken fungieren (Mrasek 2003).

Mehrere Studien kommen zu dem Ergebnis, dass eine positive Korrelation zwischen Emissionen des Luftverkehrs und einer Zunahme der Zirrusbewölkung besteht. Zirruswolken verstärken den Treibhauseffekt, da sie ebenso wie Kondensstreifen Wärmestrahlen auf die Erde reflektieren. Dennoch sind bisher die Mechanismen, die zu einer Zunahme von Zirruswolken führen, und die Wirkungszusammenhänge zwischen Kondensstreifen und dem Treibhauseffekt wissenschaftlich noch nicht ausreichend erforscht (IPPR 2001). Erst die Klärung des Entstehungsmechanismus kann letztlich den ursächlichen Zusammenhang zwischen den Luftverkehrsemissionen und der Bildung von Zirruswolken bestätigen. Der Mechanismus ist jedoch schwierig zu analysieren, da die luftverkehrsbedingten Emissionen bzw. die Entstehung der Kondensstreifen und die Bildung von Zirruswolken zeitlich verschoben sind: Kondensstreifen können vom Himmel verschwinden und erst später als Zirruswolken wieder auftauchen (FR 16.07.2003).

¹⁰ Während des Flugverbots nach den Terroranschlägen vom 11. September 2001 fanden Wissenschaftler Hinweise auf den Einfluss des Flugverkehrs auf die Temperatur. Kondensstreifen verringern den Unterschied zwischen der Tageshöchsttemperatur und dem nächtlichen Tiefstwert im Durchschnitt um mehr als ein Grad (Travis/Carleton/Lauritsen 2002). Da der Beobachtungszeitraum sehr kurz war, kann dies jedoch nur als Indiz, nicht aber als wissenschaftlicher Beweis gewertet werden.

Abbildung 2: Globale Verteilung von Kondensstreifen in der Atmosphäre und jährlicher Durchschnittswert für Klimabedingungen und Kondensstreifenbedeckung im Jahr 1992



Quelle: IPCC 1999, S. 105

Sowohl die globale Verbreitung von eisgesättigten Luftmassen als auch die Anzahl von Flügen durch diese Luftschichten beeinflussen das Maß der Bedeckung mit Kondensstreifen und Zirruswolken. Eisübersättigte Luftmassen, in denen dauerhafte Kondensstreifen und Zirruswolken gebildet werden können, sind zeitlich und räumlich variabel. Ab einer Eissättigung der Umgebungsluft von 30% entstehen durch den überschüssigen Wasserdampf Eiskristalle, die als dauerhafte Kondensationsstreifen sichtbar werden. Für die Entstehung natürlicher dauerhafter Kondensstreifen und Zirruswolken ist die Eisübersättigung in den vom Flugverkehr hoch frequentierten Regionen häufig zu gering. Da aber, wenn zusätzlich Wasserdampf durch den Luftverkehr emittiert wird, oftmals eine Eissättigung von 15% ausreicht, wirken Flugzeugabgase als Auslöser für die Bildung von Zirruswolken (CE 2002a). Regionen, in denen durch Luftverkehr potenziell Kondensstreifen und Zirruswolken auftreten, befinden sich überwiegend in der oberen Troposphäre bzw. Tropopause, d. h. in der Höhe von 16 km in den Tropen bzw. 10 km in den gemäßigten Breitengraden. Da die Höhe von 10 km eine typische Reise Flughöhe ist, wird die Bildung von Kondensstreifen und Zirruswolken durch den Flugverkehr in der nördlichen Hemisphäre begünstigt. Die eisgesättigten Regionen, in denen luftverkehrsbedingte Kondensstreifen in der Vergangenheit überwiegend aufgetreten sind, können relativ gut lokalisiert werden: Vereinigte Staaten von Amerika, Europa und der Nordatlantik (Abbildung 2).

Feuchtigkeitsmessungen haben aber gezeigt, dass bezogen auf die Flugzeit nur ca. 14% der Flugbewegung in Luftmassen stattfinden, die mit 15% eisübersättigt sind (IPCC 1999, S. 88) und in denen somit potenziell dauerhafte Kondensstreifen und Zirruswolken entstehen können. Andere Quellen (IPCC 1999, S.91) erwähnen, dass 10 bis 20% der Luftmassen im mittleren Europa, bzw. 16% im globalen Durchschnitt kalt und feucht genug sind, um persistente Kondensstreifen auszubilden. CE (2002a) nimmt an, dass 13,5% der Flugzeit durch ausreichend eisgesättigte Regionen führt und darüber hinaus in 75% der Flugzeit durch eisgesättigte Regionen (in der so genannten kritischen Flugzeit) tatsächlich Kondensstreifen gebildet werden. Ausgehend von der Annahme, dass die Flugzeit proportional zu den zurückgelegten Flugkilometern ist, kommt CE (2002a) zu dem Schluss, dass der gesamte kondensstreifenbedingte Strahlungsantrieb während nur ca. 10% der Flugzeit auftritt.

Ähnlich wie Kondensstreifen weisen **Stickoxide** (NO und NO₂, zusammengefasst als NO_x) eine sehr viel kürzere Verweilzeit in der Atmosphäre auf als Kohlendioxid und konzentrieren sich deshalb in der Nähe der Flugrouten. Es kann zu so genannten „Hot spots“, lokalen Belastungsspitzen, kommen, die insbesondere in den mittleren Breiten der nördlichen Hemisphäre auftreten (IPCC 1999), wo der Flugverkehr am intensivsten ist. Die Stickoxidkonzentration in der oberen Troposphäre ist ungefähr 1.000 mal geringer als in urbanen Regionen, die Verweilzeit für Stickoxide an der Erdoberfläche ist ca. 10 mal geringer als in der Nähe der Tropopause. Aus diesen Gründen haben die relativ geringen NO_x Emissionen des Flugverkehrs beträchtlichen Einfluss auf die Stickoxidkonzentration in der Nähe der Tropopause (Schumann 2000a).

Die Stickoxidemissionen wirken als Precursor, d.h. als Vorläufersubstanzen für weitere chemische Reaktionen, deren Produkte signifikanten Einfluss auf den Treibhauseffekt ausüben können. In der Troposphäre und der unteren Stratosphäre tragen Stickoxide des Luftverkehrs zur Bildung von Ozon bei, in darüber liegenden Schichten forcieren sie dagegen die Zerstörung von Ozon (IPCC 1999). Aufgrund der kurzen Verweilzeit¹¹ sowohl der Stickoxide als auch des Ozons verändern sich durch Stickoxidemissionen primär die regionalen klimatischen Bedingungen. Darüber hinaus führen die emittierten Stickoxide des Flugverkehrs in der oberen Troposphäre indirekt zu einer Verringerung der Konzentration des Treibhausgases Methan. Insgesamt ist das derzeitige Verständnis der Wirkung von Stickoxiden bzw. seinen Sekundärprodukten als mittelmäßig für Ozon und dürrtig für Methan einzuschätzen (IPCC 1999).

In Bodennähe haben die emittierten Stickoxide zwar keine Klimawirksamkeit, als Precursor für Ozon stellen sie jedoch ein Risiko für die menschliche Gesundheit dar, da hohe Ozonkonzentrationen zu Atemwegserkrankungen führen können. Darüber hinaus können Stickoxide zu einer Versauerung führen. Diese Gefahr besteht insbesondere in der Umgebung von Flughäfen.

¹¹ Die Verweilzeit von Ozon in der Troposphäre variiert mit der Höhe und dem Breitengrad. Durchschnittlich liegt sie in der Größenordnung von einem Monat.

Ozon schirmt die Erdoberfläche von schädlichen UV-Strahlen ab. Es ist allerdings auch ein starkes Treibhausgas, dessen Konzentration sehr variabel ist. Die Ozonkonzentration wird durch die Dynamik der atmosphärischen Chemie bestimmt, die wiederum vom Breiten- und Längengrad, der Höhenlage sowie der Hintergrundkonzentration an Ozon beeinflusst wird. Luftverkehrsbedingte Stickoxide beschleunigen die lokale photochemische Bildung von Ozon in der Troposphäre und der unteren Stratosphäre.

Da Ozon aus einer sekundären Reaktion entsteht und darüber hinaus sein Treibhauseffekt sowohl vom Ort als auch von der Jahreszeit abhängt, ist der durch das Ozon hervorgerufene Effekt schwierig mit denen von beständigen Treibhausgasen, wie Kohlendioxid, zu vergleichen (Sledsen 1998). Insgesamt, gemittelt über Jahreszeit, Tageszeit, Hintergrundkonzentration etc. wurde ein proportionaler Zusammenhang zwischen Stickoxidemission des Luftverkehrs und einer Zunahme von troposphärischem Ozon gefunden (Grewe et al. 1999). Als diese Korrelation jedoch in verschiedenen Breitengraden untersucht worden ist, wurden unterschiedliche Effekte auf der nördlichen und südlichen Hemisphäre beobachtet. Dies kann unter anderem darauf zurückgeführt werden, dass die Bildung von Ozon in der oberen Troposphäre stark von der NO_x -Hintergrundkonzentration abhängig ist, die in den verschiedenen Breitengraden variiert. Die Ozonkonzentration in der nördlichen Hemisphäre fällt durch den starken Luftverkehr insgesamt viel größer aus (Abbildung 4, Abschnitt 3.3). Hingegen wird in der südlichen Hemisphäre, wo geringe NO_x -Hintergrundkonzentrationen vorherrschen, deutlich mehr zusätzliches Ozon bei einer neu hinzukommenden NO_x -Emissionsmenge gebildet als in der nördlichen (AE 2000). Wegen der kurzen Verweilzeit von Ozon in der Atmosphäre ist eine Konzentrationsangleichung durch atmosphärische Zirkulation nur innerhalb eines Kontinents möglich (Brockhagen/Lienemeyer 1999).

Das Treibhausgas **Methan** hat ebenso wie Kohlendioxid eine lange Verweildauer in der Atmosphäre und wirkt daher global. Die Verringerung der CH_4 -Konzentration in der Troposphäre durch luftverkehrsbedingte Stickoxide wirkt dem globalen Treibhauseffekt zwar entgegen, die Wirkung tritt jedoch zeitverzögert ein. Modellierungen haben gezeigt, dass sich die Reduzierung dieses Treibhausgases – ebenso wie die Entstehung von Ozon – proportional zu den Stickoxidemissionen verhält (IPCC 1999).

Die Menge des emittierten **Schwefeldioxids** hängt im Luftverkehr direkt vom Schwefelgehalt des eingesetzten Kraftstoffes ab. Es hat einen versauernden Effekt, der aber im Vergleich zu den Stickoxiden verhältnismäßig klein ist (Sledsen 1998).

Bezüglich der Wirkung der vom Luftverkehr verursachten **Partikel** bzw. **Aerosole** auf den Treibhauseffekt sind zwei Mechanismen relevant, die wissenschaftlich gut abgesichert sind: Einerseits absorbieren und streuen Partikel bzw. Aerosole die Sonnenstrahlung sowie langwellige Strahlung direkt. Andererseits spielen sie indirekt eine wichtige Rolle in Bezug auf die Kondensstreifen- und Wolkenbildung. Sie können als Kondensationskerne für die Wolkenbildung fungieren und die physikalischen und strahlungsbezogenen Eigenschaften von Wolken verändern (IPCC 1999, S.204). Während die

Rußaerosole bei einer unvollständigen Verbrennung von Treibstoff zu einem Aufheizungseffekt führen, streuen Sulfataerosole überwiegend Sonnenstrahlung zurück in den Weltraum und haben somit einen kühlenden Effekt (IPPR 2000).

Tabelle 1 gibt einen zusammenfassenden Überblick über die relevanten Emissionen und deren Effekte.

Tabelle 1: Wirkung luftverkehrsbedingter Emissionen und ihrer Reaktionsprodukte auf den Treibhauseffekt

Emission/ Reaktionsprodukte	Beschreibung	Strahlungsantrieb		Wirkung auf Treibhauseffekt		
		Negativ= kühlend	Positiv= aufheizend	Global	Lokal/ Regional	Ort
CO ₂	Kohlendioxid	Strahlungsaktive Emission des Luftverkehrs	X	X		
H ₂ O	Wasserdampf	Strahlungsaktive Emission des Luftverkehrs; Emission, die zu einer Veränderung der natürlichen Wolkenbildung führt	X		X	
	Kondensstreifen	Veränderung der natürlichen Wolkenbildung	X		X	Überwiegend in der nördlichen Hemisphäre/ mittlere Breite
	Zirruswolken	Veränderung der natürlichen Wolkenbildung	X		X	
NO _x	Stickoxide	Emission des Luftverkehrs, die die Bildung und den Abbau strahlungsaktiver Substanzen fördert				
O ₃	Ozon	strahlungsaktive Substanz, die durch Emission des Luftverkehrs gefördert oder abgebaut wird	X Überschall	X überwiegend int. Flugverkehr	X	Überwiegend in der nördlichen Hemisphäre/ mittlere Breite
CH ₄	Methan	strahlungsaktive Substanz, die durch Emission des Luftverkehrs abgebaut wird	X da [CH ₄] ↓	X		
	Rußaerosole	Emission, die die Bildung von Aerosolen verstärkt und zu einer Veränderung der natürlichen Wolkenbildung führt		X	X	
	Sulfataerosole		X		X	

Quelle: Eigene Darstellung nach IPPR 2001; IPCC 1999

3.3 Quantifizierung der Wirkung auf den Treibhauseffekt

Die Wirkung des Luftverkehrs auf das Klima wird von dem, was durch andere anthropogene Treibhausgasemissionen und Partikel verursacht wird, sowie von der natürlichen Variabilität überlagert. Deshalb ist es nicht möglich, den Einfluss des Luftverkehrs

auf den globalen Klimawandel von allen anderen anthropogenen Aktivitäten zu trennen. Es wird allerdings angenommen, dass die Luftfahrt ungefähr proportional zu ihrem Beitrag zum Strahlungsantrieb¹² („Radiative forcing“) zum Klimawandel beiträgt. IPCC (1999) geht davon aus, dass im Jahr 1992 der Strahlungsantrieb des Flugverkehrs ca. 3,5% des gesamten anthropogen verursachten Strahlungsantriebs ausgemacht hat. Für eine detaillierte Wirkungsanalyse soll im folgenden die Treibhauswirkung der einzelnen luftverkehrsbedingten Emissionen quantifiziert werden. In diesem Zusammenhang wird zunächst das Maß der Quantifizierung diskutiert.

3.3.1 Maß der Quantifizierung

Um die Wirkung der im Kioto-Protokoll berücksichtigten Gase auf den Treibhauseffekt quantifizieren zu können, wurde das sog. Treibhausgaspotenzial (Global Warming Potential, GWP) definiert. Bei der Bestimmung des GWP wird sowohl der sog. Strahlungsantrieb als auch die Verweilzeit der betrachteten Gase und Stoffe berücksichtigt. Dieses Konzept zur Quantifizierung des Treibhauseffektes kann sinnvoll allerdings nur bei Gasen zur Anwendung kommen, die eine Verweilzeit von über zwei Jahren in der Atmosphäre aufweisen, so dass eine gute Durchmischung und Ausbreitung in der Atmosphäre gewährleistet wird (Cicero 2001). Aus diesem Grund ist das Konzept des GWP für Aerosole und kurzlebige Gase sowie für indirekten Effekte durch chemische Reaktionen, wie sie in großem Maße im Luftverkehr auftreten, nicht adäquat (IPCC 1995).

Um dennoch alle Gase und Partikel des Luftverkehrs untereinander und mit anderen Emissionen vergleichbar zu machen, wird lediglich auf den Strahlungsantrieb zurückgegriffen (IPCC 1999). Das Konzept des Strahlungsantriebs basiert auf dem Ergebnis von Klimamodellen, dass eine ungefähr lineare Beziehung zwischen dem globalen mittleren Strahlungsantrieb in der Troposphäre und der Änderung der globalen Durchschnittstemperatur auf der Oberfläche besteht. Wenn man auf das Maß des Strahlungsantriebs zurückgreift, wie es vom IPCC vorgeschlagen wird, lässt sich die Wirkung des komplexen Klimawandels auf eine globale Größe reduzieren, auf die durchschnittliche globale Temperatur. Obwohl in diesem Konzept die Verweildauer nicht explizit berücksichtigt wird, zeigt sich bei der folgenden näheren Betrachtung von Emissionswirkungen über einen längeren Zeitraum hinweg, dass diese Vereinfachung zumindest im Luftverkehr nicht die Vergleichbarkeit der Emissionswirkungen in Frage stellt.

Im Jahr 1992 lag der Strahlungsantrieb von CO₂ mit +0,018 W/m² und von Kondensstreifen mit +0,02 W/m² in der gleichen Größenordnung. Dieser Vergleich scheint zunächst nicht zulässig, da durch die kurze Verweildauer von Kondensstreifen der Strahlungsantrieb von 0,02 W/m² nur für wenige Stunden wirkt, der etwas geringere von CO₂

¹² Der Strahlungsantrieb ist ein Maß für die Störung oder Änderung des Energiegleichgewichtes der Erdatmosphäre in Watt pro Quadratmeter (W/m²) (IPCC 1999).

jedoch über einen Zeitraum von ca. 100 Jahren. Bei der Bewertung der Strahlungsantriebe müssen allerdings weitere Effekte berücksichtigt werden.

Grundsätzlich führen zwei sich überlappende und in der Wirkung verstärkende Effekte dazu, dass die Konzentration treibhauswirksamer Substanzen in der Atmosphäre ansteigt und somit eine stärkere Wirkung auf das Klima hervorruft: erstens die Akkumulation von Emission in der Atmosphäre aufgrund der Verweildauer, und zweitens die steigende Menge an Emissionen. Wenn beispielsweise immer gleich viel CO₂ emittiert wird, dann findet aufgrund der langen Verweilzeiten eine Akkumulation von CO₂ statt, die dazu führt, dass dessen Konzentration in der Atmosphäre über mehrere Dekaden ansteigt (bis zu 100 Jahren). Wenn die Emissionsmenge, wie dies beim Luftverkehr der Fall ist, stetig ansteigt, wird die Konzentration durch den zweiten Effekt zusätzlich verstärkt.

Die gleichen Effekte gelten prinzipiell auch für Kondensstreifen und Stickoxide. Bezüglich Kondensstreifen und Ozon ist jedoch die Akkumulation aufgrund der kurzen Verweilzeit kaum relevant. Allerdings ist bei Kondensstreifen zu berücksichtigen, dass das Wachstum des Luftverkehrs entsprechend aktueller Prognosen überproportional in Regionen erfolgt, die besonders sensibel für die Ausbildung von Kondensstreifen sind. Darüber hinaus führen Effizienzsteigerungen bei Triebwerken tendenziell zu geringeren Abgastemperaturen, die ebenfalls eine Zunahme der Kondensstreifenbildung zur Folge haben. Insgesamt ist bei Kondensstreifen ein überproportionaler Wachstumseffekt – auch Sensitivitätseffekt genannt (Brockhagen/Lienemeyer 1999) – zu verzeichnen, der dazu führt, dass der Strahlungsantrieb – trotz des vergleichsweise geringen Akkumulationseffektes von Kondensstreifen – relativ gesehen stärker wächst als der von CO₂.

Im Special Report des IPCC (1999) wurde die Klimawirksamkeit für drei Betrachtungszeitpunkte (1992, 2015 und 2050) untersucht und verglichen. Für CO₂ wurden nicht nur die luftverkehrsbedingten Emissionen dieser Zeitpunkte, sondern auch die seit 1950 akkumulierten Emissionen in Betracht gezogen. Bei Kondensstreifen hingegen wurden wegen der kurzen Verweildauer nur die Emissionen von 1992, 2015 und 2050 berücksichtigt. Es zeigte sich, dass für alle Zeitpunkte der Strahlungsantrieb von Kondensstreifen größer ist als der von CO₂. Dies kann darauf zurückgeführt werden, dass der Sensitivitätseffekt bei Kondensstreifen stärker ist, als die Akkumulations- und Wachstumseffekte bei CO₂.¹³ Ähnliche Betrachtungen sind für den Vergleich zwischen der Klimawirksamkeit von CO₂ und der von NO_x bzw. Ozon zulässig. Das legt die Schlussfolgerung nahe, dass trotz Nichtberücksichtigung der extrem unterschiedlichen Verweilzeiten der Emissionen, das Maß des Strahlungsantriebs sehr aussagekräftig ist und eine Vergleichbarkeit der Strahlungsantriebe einzelner luftverkehrsbedingter Emis-

¹³ Nach den neusten wissenschaftlichen Erkenntnissen ist der Strahlungsantrieb von Kondensstreifen nicht mehr größer als der von CO₂ (Marquart et al. 2003). Dennoch ist der Sensitivitätseffekt bei Kondensstreifen relativ stärker als der Akkumulations- und Wachstumseffekte bei CO₂.

sionen nicht beeinträchtigt wird. Eine detailliertere Beschreibung dieser Effekte ist bei Brockhagen/Lienemeyer (1999) zu finden.

Ähnlich wie das GWP liefert das Konzept des Strahlungsantriebs keine differenzierten Aussagen über spezifische regionale Treibhausgaseffekte. Diese können aber bei einigen Emissionen des Luftverkehrs bzw. ihrer Sekundärprodukte, wie beispielsweise Ozon, Partikel und Kondensstreifen, aufgrund der kurzen Verweilzeit von großer Relevanz sein. Trotz seiner beschränkten Aussagekraft zu regionalen Effekten wird der Strahlungsantrieb vom IPCC (1999) als ein nützliches Maß angesehen, das - in erster Näherung - die verschiedenen atmosphärischen Störungen (z. B. durch Aerosole, Wolkenveränderungen, Ozon, Wasserdampf, Methan) aufsummiert und in Bezug auf die globale Klimawirksamkeit vergleicht.

Alternativ zum Strahlungsantrieb kann auch der Strahlungsantriebsfaktor (Radiative Forcing Index) als Darstellung des Treibhauseffektes der luftverkehrsbedingten Emissionen dienen. Der Strahlungsantriebsfaktor ist ein Maß für die Bedeutung des luftverkehrsbedingten Treibhauseffektes, der über die Emission von Kohlendioxid hinausgeht. Er ist definiert als das Verhältnis des gesamten Strahlungsantriebs zum Strahlungsantrieb von Kohlendioxidemissionen allein.

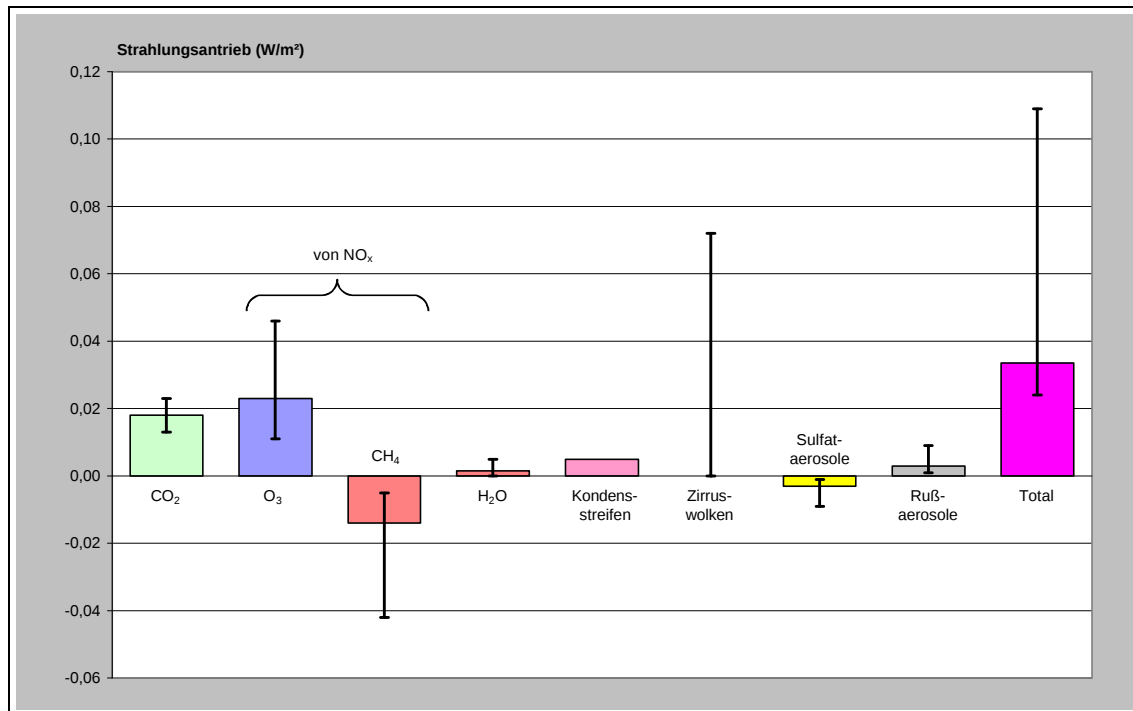
3.3.2 Quantifizierung der Wirkung im Jahr 1992

Wie einzelne Emissionen des Flugverkehrs bzw. deren Reaktionsprodukte im Jahr 1992 zum gesamten Strahlungsantrieb beitragen, ist in Abbildung 3 (Seite 38) dargestellt.

Es ist ersichtlich, dass die quantitative Abschätzung des Strahlungsantriebs der einzelnen Emissionen und Reaktionsprodukte mit großen Unsicherheiten behaftet ist. Grundsätzlich können luftverkehrsbedingte Emissionen sowohl einen positiven als auch einen negativen Strahlungsantrieb aufweisen, d.h. sie können den Treibhauseffekt unterstützen (Aufheizungseffekt) oder ihm entgegenwirken (Abkühlungseffekt). Offensichtlich ist jedoch, dass der Strahlungsantrieb des Kohlendioxids (mit $0,018 \text{ W/m}^2 \pm 30\%$) aus dem Luftverkehr nur einen Teil des gesamten Strahlungseffekts aller klimawirkenden Emissionen des Flugverkehrs darstellt. Der IPCC (1999) schätzt, dass der Strahlungsantrieb des gesamten Flugverkehrs um den Faktor 2 bis 4 größer ist als der Strahlungsantrieb von Kohlendioxid allein, d.h. der Strahlungsantriebsfaktor zwischen 2 und 4 liegt. Konkretisiert wird diese Schätzung dahingehend, dass der gesamte Strahlungsantrieb des Luftverkehrs im Jahr 1992 2,7 mal so groß war wie der des Kohlendioxids allein, allerdings mit einer Unsicherheit von mindestens $\pm 1,5$ (IPCC 1999). Diese Schätzung ist gleichbedeutend damit, dass das Kohlendioxid am Strahlungsantrieb der luftverkehrsbedingten Emissionen nur etwa ein Drittel (37%) ausmacht. Zum Zeitpunkt der Schätzungen des IPCC war der mögliche Beitrag der zusätzlichen Zirkusbewölkung – der nach neusten wissenschaftlichen Erkenntnissen noch größer sein kann als vom IPCC (1999) vermutet – noch so unsicher, dass er unberücksichtigt blieb. Darüber hinaus wurde von einem höheren Strahlungsantrieb

von Kondensstreifen ausgegangen ($0,02 \text{ W/m}^2$). Nach neueren wissenschaftlichen Erkenntnissen liegt der Strahlungsantrieb von Kondensstreifen jedoch bei $0,0035 \text{ W/m}^2$.

Abbildung 3: Luftverkehrsbedingter Strahlungsantrieb im Jahr 1992



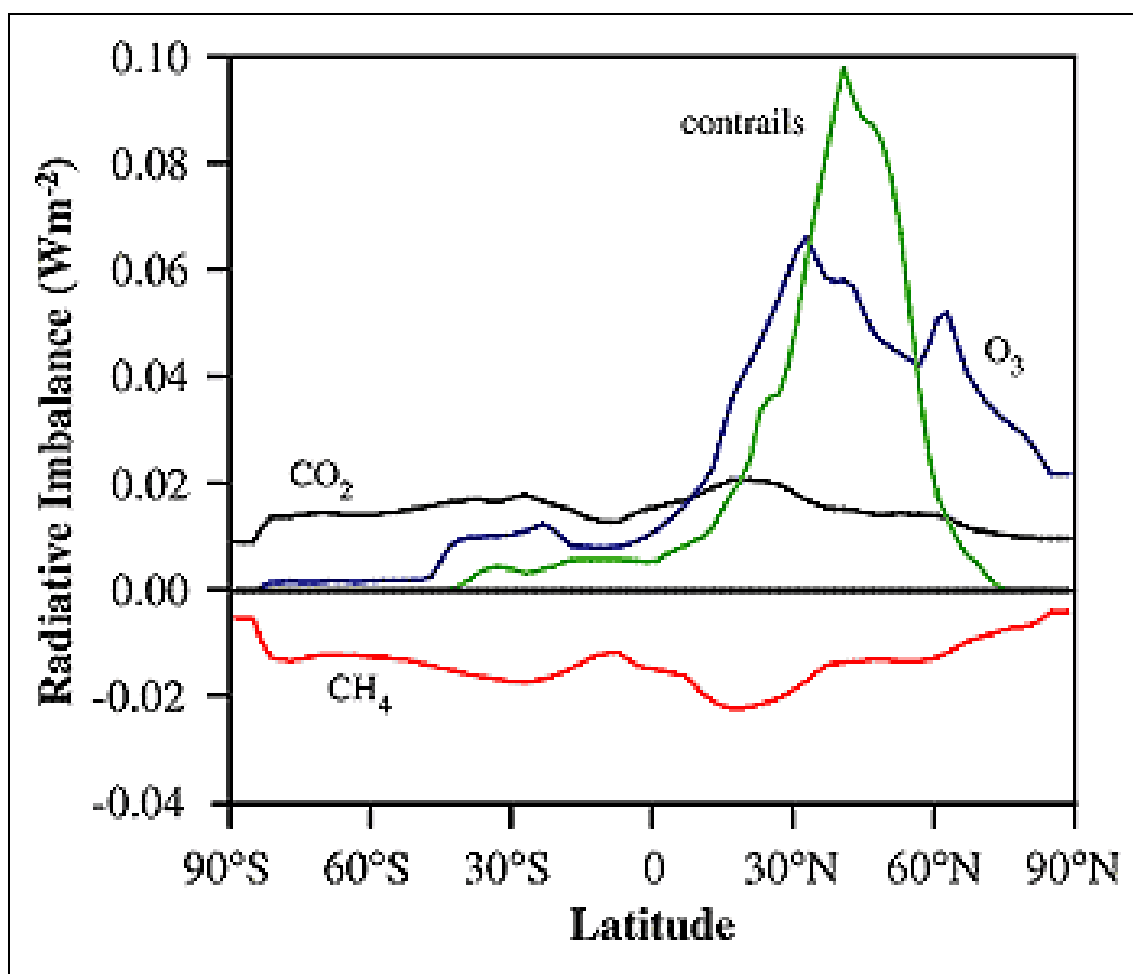
Anmerkung: Für die Wirkung von Kondensstreifen nach neuen wissenschaftlichen Erkenntnissen sind derzeit in der Literatur keine Fehlerindikatoren verfügbar.

Quellen: IPCC 1999, S. 210; Marquart et al. 2003; Mannstein 2003b; CAEP 2003, eigene Darstellung

Die durch Stickoxidemissionen hervorgerufenen Klimaeffekte, Methanabbau und Ozonbildung, sollten getrennt betrachtet werden. Zunächst wirken sie in unterschiedlichen Zeithorizonten, Effekte durch Methanreduzierung wirken zeitverzögert (IPCC 1999), Effekte durch Ozonbildung hingegen fast unmittelbar. Während der Abbau von Methan gleichermaßen in der südlichen und nördlichen Hemisphäre auftritt, trägt die Bildung von Ozon, insbesondere in der mittleren nördlichen Hemisphäre zum Strahlungsantrieb des Luftverkehrs bei. Die Reaktion des Klimasystems auf geographisch so inhomogene Strahlungskräfte ist nicht bekannt. Zu erwarten ist ein regionaler Klimawandel, aber auch auf globaler Ebene sind Konsequenzen nicht auszuschließen. Es gibt sogar Hinweise darauf, dass inhomogen verteilter Strahlungsantrieb stärker auf das Klima wirkt als homogen verteilter (Ponater et al. 1999 in AE 2000).

An dieser Stelle stößt das Konzept des Strahlungsantriebs an seine Grenzen, da mit diesem Maß keine differenzierten Aussagen über den regionalen und globalen Klimawandel möglich sind. Abbildung 4 zeigt, in welcher Größenordnung der Strahlungsantrieb verschiedener Emissionen bzw. Reaktionsprodukte in Abhängigkeit des Breitengrades im Jahr 1992 gelegen hat.

Abbildung 4: Zonen- und jährliche mittlere Strahlungsungleichgewichte in der Tropopause (nach Anpassung der stratosphärischen Temperatur) als eine Funktion der geographischen Breite in Folge des Luftverkehrs im Jahr 1992



Quelle: IPCC 1999

Das Strahlungsungleichgewicht von Kohlendioxid und Methan ist unabhängig vom Breitengrad nahezu gleich bleibend, während der Strahlungsantrieb für Ozon und Kondensstreifen in den mittleren Breiten der nördlichen Hemisphäre stark zunimmt. Für Ozon liegt das Maximum bei 30 Grad nördlicher Breite, für Kondensstreifen etwa bei 40 Grad nördlicher Breite.

Der Beitrag der Kondensstreifen zum Strahlungsantrieb entspricht nach Angaben des IPCC (1999) durchschnittlich etwa dem Beitrag der CO₂-Emissionen. Die neuesten wissenschaftlichen Erkenntnisse nach Marquart et al. (2003) zeigen jedoch, dass der Strahlungsantrieb – zumindest für linienförmige Kondensstreifen – auf 0,0035 W/m² korrigiert werden muss (Abbildung 3).¹⁴ Der Strahlungsantrieb variiert zwar regional in bedeutendem Maße (Abbildung 4).¹⁵ Wenn, wie in CE (2002a) angenommen wird, nur in 10% der gesamten Flugzeit Kondensstreifen gebildet werden (Abschnitt 3.2), dann wirkt ein Flugkilometer mit Kondensstreifenbildung im Mittel ungefähr doppelt so stark auf den Treibhauseffekt, wie ein Flugkilometer, der keine Kondensstreifen hervorruft.

Noch schwerer zu quantifizieren ist der Beitrag von Zirruswolken zum Treibhauseffekt, da nicht einmal die Bildung dieser Wolken wissenschaftlich hinreichend erforscht ist. Vom IPCC (1999) wurde geschätzt, dass Zirruswolken einen durchschnittlichen Strahlungsantrieb zwischen 0 und 0,04 W/m² aufweisen. Nach den neuesten wissenschaftlichen Erkenntnissen (Mannstein 2003b) muss die mögliche Bandbreite jedoch auf 0 - 0,75 W/m² erweitert werden.¹⁶ Der möglicherweise sehr große Strahlungsantrieb der Zirruswolken wird lediglich durch einen Teil der durch eisgesättigte Regionen verlaufenden Flugbewegungen verursacht. Geht man von den höheren Werten des Strahlungsantriebs aus und berücksichtigt zudem, dass dieser Strahlungsantrieb lediglich durch einen kleinen Anteil der weltweiten, aggregierten Verkehrsleistung des Luftverkehrs verursacht wird, so dürfte die spezifische Klimawirksamkeit eines Flugkilometers, bei dem Zirruswolken entstehen, extrem hoch sein.

¹⁴ Marquart et al. (2003) haben den Strahlungsantrieb von linienförmigen Kondensstreifen ermittelt. Differenzen hinsichtlich der Größenordnung des Strahlungsantriebs von Kondensstreifen zwischen IPCC (1999) und Marquart et al. (2003) lassen sich u.a. darauf zurückführen, dass bei der Ermittlung des Strahlungsantriebes nach IPCC 1999 keine Differenzierung zwischen dem Strahlungsantrieb der Kondensstreifen und dem der darunter liegenden natürlichen Wolken vorgenommen worden ist. Mit anderen Worten, die Klimawirksamkeit der linearen Kondensstreifen wurde in den Fällen überschätzt, in denen sich natürliche Wolken unterhalb der Kondensstreifen befanden, da letztendlich diese und nicht die Kondensstreifen für den wärmenden Effekt verantwortlich sind. Auch konnte beim IPCC (1999) noch keine klare Trennung zwischen dem Strahlungsantrieb linienförmiger und gealterter, d.h. nicht mehr linienförmiger Kondensstreifen vorgenommen werden (Sausen 2003).

¹⁵ Die absoluten Werte des Strahlungsantriebs von Kondensstreifen in Abbildung 4 entsprechen den Werten des IPCC (1999) und müssten streng genommen an die neusten wissenschaftlichen Erkenntnisse angepasst werden.

¹⁶ Mannstein (2003a) hat mit Hilfe von Flugstatistiken und Satellitenaufnahmen einen Zusammenhang zwischen den Flugbewegungen und der Verteilung von Zirruswolken über Europa feststellen können. Die Auswertung zeigte, dass die Zirrusbewölkung über Europa zehnmal größer ist als die Bedeckung durch lineare Kondensstreifen. Weiterer Forschungsbedarf zur Absicherung dieser wissenschaftlichen Erkenntnisse besteht jedoch hinsichtlich der Bestimmung der optischen Dichte dieser Wolken. Erst mit Hilfe einer Auswertung der optischen Dichte kann der Strahlungsantrieb und damit die Klimawirksamkeit von Zirruswolken quantifiziert werden.

Sulfataerosole tragen schätzungsweise mit einem Strahlungsantrieb von $-0,003 \text{ W/m}^2$ zum Treibhauseffekt bei, mit einer Unsicherheit die zwischen $-0,001$ und $+0,009 \text{ W/m}^2$ liegt. Rußaerosole haben einen Strahlungsantrieb in der gleichen Größenordnung, nur mit positivem Vorzeichen.

In Tabelle 2 sind der Strahlungsantrieb der einzelnen luftverkehrsbedingten Emissionen und Sekundärprodukte in absoluten Werten sowie ihre Anteile am gesamten Strahlungsantrieb zusammengefasst. Diese Werte entsprechen dem Stand der Wissenschaft, sind aber, wie bereits in Abbildung 3 dargestellt, mit zum Teil erheblichen Unsicherheiten belastet.

Tabelle 2: Luftverkehrsbedingter Strahlungsantrieb im Jahr 1992

Emissionen, Produkte von Sekundärreaktionen	Mittlerer Strahlungsantrieb				Anteil am Strahlungsantrieb						Strahlungsantriebsfaktor (RFI)						
	1)	1), 2), 3)			ohne Zirruswolken			mit Zirruswolken			ohne Zirruswolken			mit Zirruswolken			
		Unter- grenze	Durch- schnitt	Ober- grenze	Unter- grenze	Durch- schnitt	Ober- grenze	Unter- grenze	Durch- schnitt	Ober- grenze	Unter- grenze	Durch- schnitt	Ober- grenze	Unter- grenze	Durch- schnitt	Ober- grenze	
	- W/m ² -				- % -												
CO ₂	+0,0180	+0,0130	+0,0180	+0,0230	58	56	65	58	37	21	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	
NO _x	Ozon	+0,0230	+0,0110	+0,0230	+0,0460	27	28	11	27	18	4	0,5	0,5	0,2	0,5	0,5	0,2
	Methan	-0,0140	-0,0050	-0,0140	-0,0420												
H ₂ O	Direkt	+0,0015	+0,0000	+0,0015	+0,0050	0	5	14	0	3	5	0,0	0,1	0,2	0,0	0,1	0,2
	Kondensstreifen	+0,0200	+0,0035	+0,0035	+0,0035	16	11	10	16	7	3	0,3	0,2	0,2	0,3	0,2	0,2
	Zirruswolken	0 to +0,0400	+0,0000	+0,0170	+0,0750				0	35	68	0,0	0,0	0,0	0,0	0,9	3,3
Sulfataerosole	-0,0030	-0,0010	-0,0030	-0,0090	insgesamt neutral			insgesamt neutral			insgesamt neutral			insgesamt neutral			
Rußaerosole	+0,0030	+0,0010	+0,0030	+0,0090													
Total ohne Zirruswolken	+0,0480	+0,0225	+0,0320	+0,0355	100	100	100	100	65	32	1,7	1,8	1,5	1,7	1,8	1,5	
Total mit Zirruswolken	+0,0880	+0,0225	+0,0490	+0,1105				100	100	100				1,7	2,7	4,8	
1) IPCC 1999, 2) Marquart et al. 2003, 3) CAEP 2003																	

1) IPCC 1999, 2) Marquart et al. 2003, 3) CAEP 2003

Quelle: IPCC 1999, Marquart et al. 2003, CAEP 2003, eigene Darstellung

Diese Werte stellen eine wichtige Ausgangsbasis für die Bemessungsgrundlage des Emissionshandelssystems dar. Zu berücksichtigen ist allerdings, dass das durch diese Werte beschriebene Strahlungsungleichgewicht nicht nur durch den internationalen, sondern zu einem gewissen Anteil auch durch den Militär- und den nationalen Flugverkehr verursacht worden ist.

Wie mit den bestehenden Unsicherheiten sowie mit der Klimawirksamkeit von Zirruswolken bei einer quantifizierten Aussage über die Klimawirksamkeit umgegangen wird, ist Ermessenssache. Mit dem derzeitigen Stand der Wissenschaft wird die Bemessungsgrundlage eines Emissionshandelssystems durchaus intensive Diskussionen induzieren, da man aufgrund der wissenschaftlichen Unsicherheit nicht zweifelsfrei klären kann, ob die Klimawirksamkeit des Luftverkehrs über- oder unterschätzt wird. Wenn man für das Emissionshandelssystem einen Strahlungsantriebsfaktor von 2,7 ansetzt, d.h. sich auf die oben genannten Werte stützt, kann man allerdings davon ausgehen, dass – obwohl bei diesem Wert die Klimawirksamkeit der Kondensstreifen überschätzt wird – die Wirkung tendenziell unterschätzt wird, da man die Klimawirksamkeit der Zirruswolken unberücksichtigt lässt. Dieser Ansatz erscheint aufgrund der

Datenlage und im Sinne einer konservativen Vorgehensweise ein notwendiger und sinnvoller Kompromiss.

Zu einem späteren Zeitpunkt, wenn sich entweder die Klimawirksamkeit wissenschaftlich besser nachvollziehen lässt oder sich die Klimawirksamkeit der einzelnen Emissionen aufgrund der erhöhten Hintergrundkonzentrationen und ausgestoßenen Emissionsmengen verändern (siehe nächster Abschnitt), sollten diese Veränderungen in Form einer Anpassung der Bemessungsgrundlage berücksichtigt werden.

3.3.3 Quantifizierung der Wirkung im Jahr 2050

Vom IPCC (1999) werden verschiedene Emissionsprojektionen für 2050 vorgestellt. Sie variieren in einer großen Bandbreite. Der Anteil des Flugverkehrs am gesamten anthropogenen Strahlungsungleichgewicht in 2050 variiert in den einzelnen Szenarien zwischen ca. 4% und 15%. In Abbildung 5 (Seite 43) wird der Strahlungsantrieb der luftverkehrsbedingten Emissionen im Jahr 2050 im Szenario Fa1¹⁷ dargestellt. In diesem Szenario wurde ermittelt, dass die Strahlungsleistung des Flugverkehrs bis zum Jahr 2050 auf $0,19 \text{ W/m}^2$ zunehmen wird. Der Anteil des Flugverkehrs am anthropogen verursachten Strahlungsungleichgewicht steigt bei dieser Projektion auf 5% (IPCC 1999, S. 210). Es nehmen jedoch nicht alle Teileffekte in gleichem Maße zu. Wie in Abbildung 5 zu erkennen, wird im Jahr 2050 der Strahlungsantrieb von Ozon unter dem von Kohlendioxid liegen. Gleichzeitig nimmt der Anteil der Kondensstreifen auf fast 53% zu.¹⁸

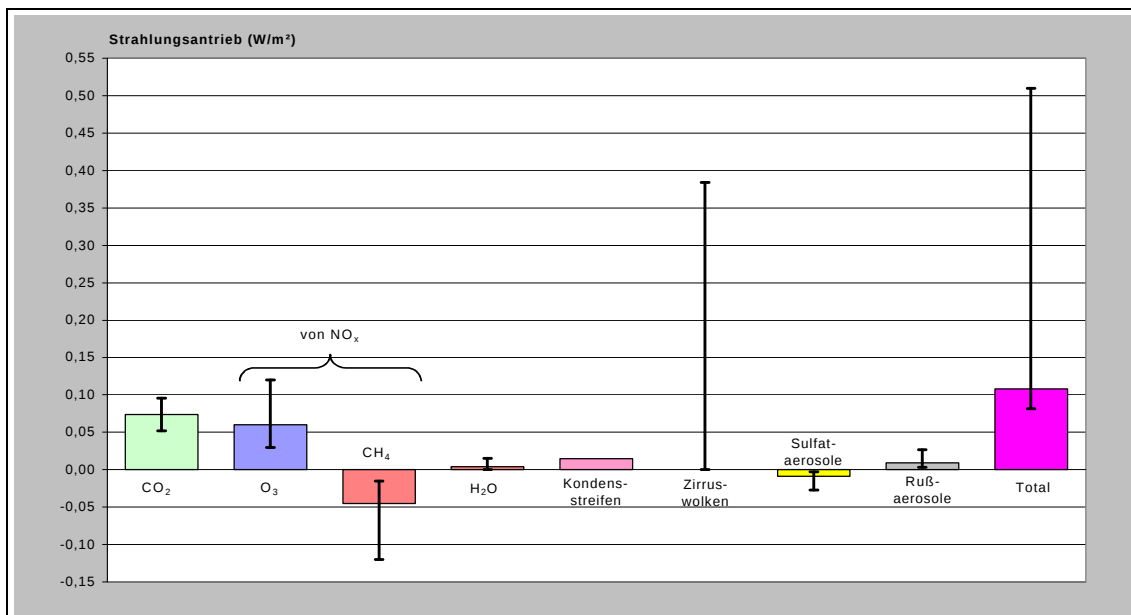
Neben diesen Berechnungen für Unterschallflugzeuge hat das IPCC (1999) auch die Folgen eines zunehmenden Einsatzes von Überschallflugzeugen (High Speed Civil Transport: HSCT) untersucht. In den zu Grunde liegenden Modellen wird von einem linearen Anstieg von 2015 bis 2040 auf dann 1.000 Maschinen ausgegangen, die einen Teil der Unterschallflugzeuge ersetzen. Angenommen wurde der Einsatz neuester Technologie mit nur 5g NO_x-Emissionen pro kg verbranntem Treibstoff.

Die Berechnungen dieses Szenarios ergeben zusätzliche $0,08 \text{ W/m}^2$, da jedes Überschallflugzeug das Fünffache des Strahlungsantriebs des ersetzten Unterschallflugzeuges erzeugt. In Abbildung 6 (Seite 43) sind die direkten Effekte der Überschallflugzeuge für das Jahr 2050 bei einer Flotte von 1.000 Maschinen als weiße Balken dargestellt. Die schwarzen Balken zeigen die Veränderungen durch ersetzte Unterschallflugzeuge.

¹⁷ Dem Szenario Fa1 liegt die Annahme zu Grunde, dass nach einer Marktsättigung der Zuwachs proportional zum Wachstum des GDP verläuft. Von 1990-2025 wird ein jährliches Wachstum des GDP von 2,9% angenommen, für 1990-2100 ein Wachstum von 2,3%. Die Ziffer 1 bezieht sich auf das angenommene Technologie-Niveau: Treibstoffeffizienz und Reduzierung der NO_x-Emissionen werden mit gleicher Schwerpunktsetzung fortgesetzt.

¹⁸ Nach den neuesten wissenschaftlichen Erkenntnissen (Marquart et al. 2003) wird der Strahlungsantrieb von Kondensstreifen für das Jahr 2050 auf lediglich $14,8 \text{ mW/m}^2$ geschätzt. Die mögliche Bandbreite an Klimawirksamkeit von Zirruswolken hingegen muss tendenziell erweitert werden.

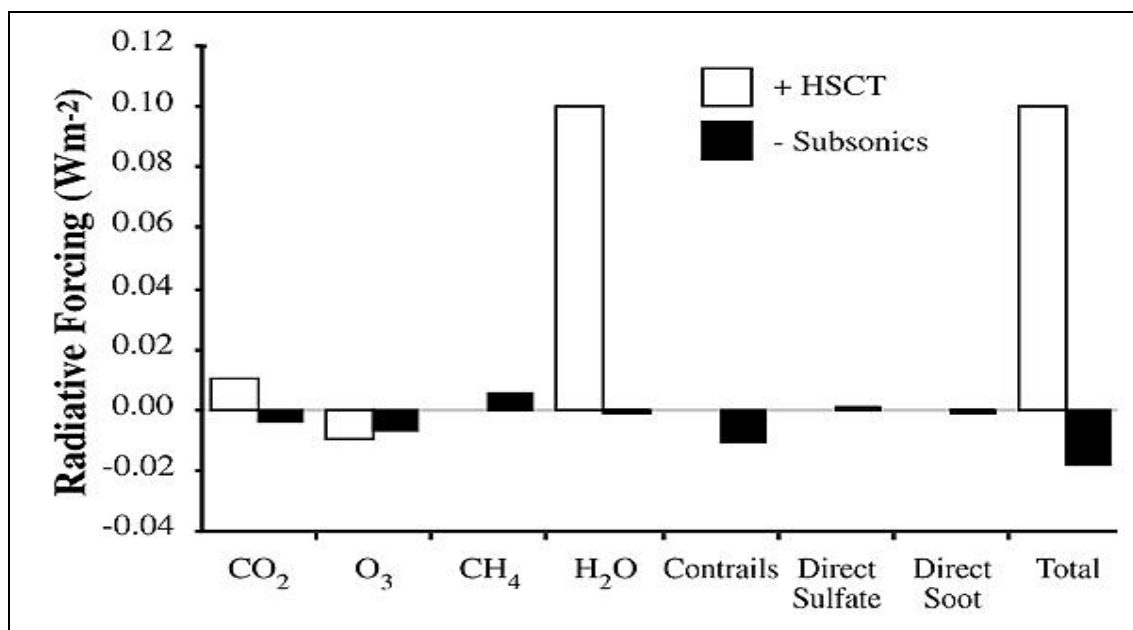
Abbildung 5: Luftverkehrsbedingter Strahlungsantrieb im Jahr 2050



Anmerkung: Für die Wirkung von Kondensstreifen nach neuen wissenschaftlichen Erkenntnissen sind derzeit in der Literatur keine Fehlerindikatoren verfügbar.

Quellen: IPCC 1999, S. 210; Marquart et al. 2003; Mannstein 2003b; CAEP 2003, eigene Darstellung

Abbildung 6: Strahlungsantrieb der Überschallflugzeuge (HSCT) und der ersetzten Unterschallflugzeuge für das Jahr 2050



Quelle: IPCC 1999

Durch eine Flughöhe von etwa 20 km verursachen Überschallflugzeuge Wasserdampf-Akkumulationen in der Stratosphäre, die nur mit großen Unsicherheiten zu quantifizieren sind. Den Berechnungen zufolge ist der Wasserdampfausstoß der dominierende Klimafaktor von Überschallflugzeugen, der für eine Flotte von 1.000 Maschinen auf ca. $0,1 \text{ W/m}^2$ ($0,03 - 0,3 \text{ W/m}^2$) geschätzt wird (IPCC 1999, S. 203).

4. Zentrale Ausgestaltungsoptionen

Ein Emissionshandelssystem basiert auf den Emissionsrechten, die zur Emission einer bestimmten Menge berechtigen und die frei gehandelt werden können. Die Emissionsrechte können z.B. versteigert oder kostenlos entsprechend historischer Emissionen (Grandfathering) vergeben werden. Entscheidend ist jedenfalls, dass die Menge der in Umlauf gebrachten Emissionsrechte dem angestrebten Emissionsziel entspricht und damit in der Höhe der Emissionen absolut begrenzt ist. Marktteilnehmer, deren Vermeidungskosten niedriger sind als der Marktpreis für die Emissionsrechte, werden ihre Vermeidungsoptionen umsetzen und Emissionsrechte bzw. die entsprechenden Zertifikate anbieten. Akteure, deren Vermeidungskosten jedoch höher sind als der Marktpreis für Emissionsrechte, werden Emissionsrechte erwerben, um damit ihrer Nachweisverpflichtung für Emissionsrechte nachzukommen.

Trotz dieser recht einfachen Grundidee des Emissionshandels müssen für die Umsetzung eines solchen Systems etliche Detailfragen geklärt werden. So muss beispielsweise entschieden werden, welches Emissionsziel – im Englischen Cap genannt – durch das Emissionshandelssystem erreicht werden soll. Speziell auch für den Flugverkehr muss festgelegt werden, welche Emissionen von dem Handelssystem erfasst werden sollen (Bemessungsgrundlage). Darüber hinaus muss geklärt werden, ob das Emissionshandelssystem auf absoluten oder relativen Zielen beruhen soll (Ansatz), wer zum Nachweis der Emissionsrechte verpflichtet wird (Verpflichtete), wie die Emissionsrechte ausgegeben werden (Primärallokation), wo die genauen Grenzen des Emissionshandelssystems sind (Abgrenzung), wie die Emissionsrechte gehandelt werden können (Handelsregime), wie die Einhaltung der Regeln überwacht wird (Monitoring) und welche Sanktionen im Falle der Nichteinhaltung von Regeln wirksam werden sollen. Alle diese Fragen werden in den folgenden Abschnitten im Hinblick auf das detaillierte Design eines Emissionshandelssystems für den internationalen Luftverkehr diskutiert und bewertet.

Für die Bewertung der einzelnen Ausgestaltungsoptionen sind folgende Kriterien von Bedeutung:

- ? **Ökologische Effektivität:** Das angestrebte Ziel soll durch das Handelssystem sicher erreicht werden können.
- ? **Ökonomische Effizienz:** Das ökologische Ziel soll mit dem ökonomisch minimalen Mitteleinsatz erreicht werden. Dabei ist insbesondere auch zu berücksichtigen, dass die so genannten Transaktionskosten, also die Aufwendungen für die Administration, die Kontrolle und die Abwicklung des Systems nicht höher ausfallen als die Effizienzgewinne des Emissionshandels gegenüber anderen umweltpolitischen Instrumenten.
- ? **Praktische Implementierbarkeit:** Die einzelnen Ausgestaltungsoptionen müssen operationalisierbar sein und später auch tatsächlich umgesetzt werden können.

- ? Politische Akzeptanz: Das Emissionshandelssystem sollte so ausgestaltet werden, dass es von den teilnehmenden Ländern wie auch von den betroffenen Akteuren in diesen Ländern im Grundsatz akzeptiert werden kann. Dies schließt eine angemessene Verteilung von ggf. entstehenden finanziellen Lasten mit ein.
- ? Kompatibilität mit dem Kioto-Protokoll: Das Emissionshandelssystem sollte mit den Festlegungen des Kioto-Protokolls vereinbar sein, unabhängig davon, ob das Handelssystem unmittelbar oder nur mittelbar mit dem Emissionshandel unter dem Kioto-Protokoll verbunden ist.

Ein angemessenes Emissionshandelssystem für den internationalen Luftverkehr kann dabei nur entwickelt werden, wenn alle Kriterien gleichermaßen berücksichtigt werden und bei Zielkonflikten auf eine angemessene Abwägung der widerstreitenden Kriterien geachtet wird.

4.1 Abgrenzung

Der gesamte Luftverkehr kann in verschiedene Kategorien differenziert werden:

- ? der zivile Luftverkehr, der den kommerziellen Transport von Gütern und Personen umfasst,
- ? der militärische Flugverkehr und
- ? der Sichtflug, der Freizeit- und kleine Firmenflugzeuge umfasst.

Den zivilen Luftverkehr kann man wiederum einteilen in den nationalen¹⁹ und den internationalen Luftverkehr. Der zivile internationale Luftverkehr ist für die größte Zahl an Flugbewegungen verantwortlich. Er verursacht schätzungsweise 80 - 85% der luftverkehrsbedingten Emissionen.

Sichtflüge sind für weniger als 5% des Treibstoffverbrauchs und der Umweltverschmutzung des Luftverkehrs verantwortlich (Kalivoda 1997). Ihre Emissionen wirken überwiegend in Bodennähe. Da in Bodennähe vor allem Kohlendioxid als luftverkehrsbedingte Emission klimawirksam ist, tragen die Sichtflüge deutlich weniger als 5% zur Klimawirksamkeit des Luftverkehrs bei. Der Anteil der Militärflugzeuge an den luftverkehrsbedingten CO₂-Emissionen beträgt heutzutage ca. 10 – 12%, der Anteil an den luftverkehrsbedingten NO_x-Emissionen ist dagegen noch geringer und liegt bei schätzungsweise 6 – 10%. Die NO_x-Emissionen dieser Kategorie wirken überwiegend auch

¹⁹ Unter den nationalen Flugverkehr fallen nach IPCC (2000) die Flugbewegungen, deren Start und Landung in dem jeweiligen Nationalstaat stattfinden. Wenn die Landung einen Zwischenstopp vor einem Flug ins Ausland darstellt, dann fällt der Inlandsflug genau dann unter den nationalen Luftverkehr, wenn Passagiere ein- und aussteigen, bzw. Fracht geladen oder entladen wird. Wenn letzteres jedoch nicht der Fall ist, fällt der Flug unter den internationalen Flugverkehr.

in Bodennähe und sind daher weniger klimawirksam als die des internationalen zivilen Flugverkehrs.²⁰

Mehrere Gründe sprechen dafür, lediglich den zivilen internationalen Flugverkehr in ein internationales Emissionshandelssystem einzubeziehen. Der Sichtflug umfasst überwiegend nationale Flüge. Die CO₂-Emissionen dieser Flüge werden deshalb im Rahmen der nationalen Treibhausgasinventare erfasst und unterliegen somit bereits den nationalen Reduktionspflichten des Kioto-Protokolls. Gleiches gilt für Militärflüge soweit diese nicht internationale Flüge sind.

Darüber hinaus ist die Datenverfügbarkeit für den Sicht- und Militärflug deutlich schlechter als für den zivilen Luftverkehr. Während es für den Sichtflug kaum Daten gibt, unterliegen sie beim Militärflug der Geheimhaltung.

Auch wenn die Emissionen der Sicht- und Militärflüge nicht berücksichtigt würden, wäre die ökologische Lenkungsfunction eines Emissionshandelssystems für internationalen Luftverkehr groß, da die Instrumentenflüge mit Abstand für den größten Teil der klimawirksamen Emissionen des Luftverkehrs verantwortlich sind. Die Flugbewegungen der anderen beiden Kategorien machen aufgrund der deutlich geringeren Zahl der Flüge sowie der geringeren Flughöhe nur einen geringen Anteil der Klimawirksamkeit des Luftverkehrs aus.

Sofern das Emissionshandelssystem beim Emittenten ansetzt (downstream), könnten beim internationalen Luftverkehr, anders als bei Sichtflügen, Luftfahrtgesellschaften zum Nachweis der Emissionsrechte verpflichtet werden. Da diese Akteurgruppe sehr homogen und zugleich überschaubar ist, erleichtert dies die Operationalisierbarkeit des Emissionshandelssystems deutlich.

Zur formalen Abgrenzung zwischen internationalem Luftverkehr (Instrumentenflug) und Sichtflug wird – ähnlich wie bei CE (2002b) – eine Bagatellgrenze vorgeschlagen: erfasst würden demnach nur zivile Flüge von Flugzeugen mit 40 oder mehr Sitzplätzen und einem Gesamtgewicht von mindestens 9 t. Flugzeuge unterhalb dieser Größe werden fast ausschließlich im nationalen Flugverkehr eingesetzt (CE 2002b) und sollen daher nicht vom Emissionshandelssystem erfasst werden.

Des Weiteren sollte dieses Handelssystem zunächst nur Unterschallflugzeuge erfassen. Auf Überschallflugzeuge könnte es zwar grundsätzlich auch angewendet werden, aber da die Klimawirksamkeit von Überschallflügen grundlegend anders ist, müsste die Bemessungsgrundlage für diese Flüge anders ausgestaltet werden. Auch diese Einschränkung scheint akzeptabel, da derzeit nur sehr wenige Überschallflugzeuge im

²⁰ Durch NASA, ANCAT und DLR wurden Emissionsinventare für die Jahre 1992 und 2015 erstellt (IPCC 1999). 1992 betrug der Anteil der luftverkehrsbedingten CO₂-Emissionen durch das Militär je nach Inventar zwischen 13 und 18%, für das Jahr 2015 wird ein Anteil von 5 bis 7% prognostiziert. Der Anteil der NO_x-Emissionen, die durch das Militär verursacht wurden, lag 1992 zwischen 11 und 13%, für 2015 wird der Anteil auf ca. 4,5% prognostiziert.

Einsatz sind (vgl. Fußnote 9). Zwar wird in den Szenarien des IPCC (1999) von einem Anstieg zwischen 2015 und 2040 auf 1.000 Flugzeuge ausgegangen, doch derzeit ist noch völlig unklar, ob tatsächlich neue Überschallflugzeuge für die zivile Luftfahrt konstruiert werden (The Economist, 27. April 2002). Sollte mit der Zeit absehbar sein, dass sich tatsächlich ein substanzieller Markt für zivile Überschallflugzeuge herausbildet, so müssten sie nachträglich in das Emissionshandelssystem durch die Entwicklung einer adäquaten Bemessungsgrundlage einbezogen werden.

Für das Design des Handelssystems ist es weit gehend gleichgültig, welche oder wie viele Staaten an so einem Handelssystem teilnehmen. Allerdings kann ein solches System wohl auch nur etabliert werden, wenn eine Mindestmenge an Staaten an ihm teilnimmt, da sonst die Option des so genannten Schwarzfahrens (Free riding) für alle potenziellen Teilnehmer zu groß wird. Diese Mindestmenge dürfte etwa in der Größenordnung des Annex I liegen, also bei 30 bis 35 Staaten. Hinsichtlich der durch das System erzielten absoluten Minderung ist die Anzahl der teilnehmenden Staaten von enormer Bedeutung. Denn dabei gilt grundsätzlich, dass die erzielte Treibhausgasmin- derung um so größer sein wird, je mehr Staaten teilnehmen. Darüber hinaus verbessert sich – wie etliche empirische Studien und Modellsimulationen zeigen (Cames et al. 2001) – die ökonomische Effizienz eines Emissionshandelssystems, je mehr Staaten und Sektoren vom System erfasst werden.

Hinsichtlich der geografischen Abgrenzung des Emissionshandelssystems ist es nahe- liegend, zunächst davon auszugehen, dass alle so genannten Annex I-Staaten, die das Kioto-Protokoll ratifiziert haben, am Emissionshandel im internationalen Luftverkehr teilnehmen. Zusätzlich sollte jedoch anderen Ländern die Möglichkeit eingeräumt wer- den, am internationalen Emissionshandel im zivilen Luftverkehr teilzunehmen. Auf die- se Weise können Ausweichreaktionen verringert und die erzielte Minderung bzw. die Effizienz des Systems erhöht werden. Die Möglichkeit einer freiwilligen Teilnahme er- scheint beispielsweise für die USA sinnvoll. Obwohl die Vereinigten Staaten eindeutig erklärt haben, dass sie das Kioto-Protokoll nicht ratifizieren werden, zeigen sie jedoch grundsätzlich Interesse, am internationalen Emissionshandelssystem im Luftverkehr teilzunehmen.²¹

Im Falle eines geschlossenen Emissionshandelssystems ist es im Grunde unerheblich, ob die Gruppe der teilnehmenden Staaten mit der Gruppe der Annex I-Staaten über- einstimmt, da in diesem Falle ein paralleles, unabhängiges Emissionshandelssystem aufgebaut wird. Im Falle eines offenen Emissionshandels entstehen zusätzliche Kom- plikationen, wenn die Gruppe der am Emissionshandel im Luftverkehr teilnehmenden Staaten von der Gruppe der am Emissionshandel unter dem Kioto-Protokoll teilneh-

²¹ Auch die freiwillige Teilnahme einiger Stadtstaaten wie beispielsweise Hongkong und Sin- gapur erscheint sehr vorteilhaft für das Emissionshandelssystem, da die Möglichkeit der Ausweichreaktionen verringert wird. Aufgrund der Umsatzstärke der Fluggesellschaften die- ser Länder wird darüber hinaus der Anteil, der in das System einbezogenen Flugbewegun- gen, merklich erhöht.

menden Staaten abweicht. In diesem Falle müsste sichergestellt werden, dass Emissionsrechte beider Systeme wechselseitig anerkannt werden und grundsätzlich konvertibel sind. Trotz des damit verbundenen höheren administrativen Aufwands dürfte die Kopplung zweier Emissionshandelssysteme allerdings auch bei abweichenden Gruppen der teilnehmenden Staaten keine unüberwindbare Hürde sein.

4.2 Handelsregime

Bei der Ausgestaltung eines Emissionshandelssystems für Treibhausgase im internationalen Flugverkehr stellt sich zunächst grundlegend die Frage, ob und wenn ja, in welcher Form das System mit dem Emissionshandel des Kioto-Protokolls interagieren soll. Dabei können prinzipiell drei Alternativen differenziert werden:

- ? Geschlossener Emissionshandel: Das Emissionshandelssystem bezieht sich nur auf den internationalen Luftverkehr. Eine Interaktion mit dem Emissionshandel im Rahmen des Kioto-Protokolls findet nicht statt. Emissionsrechte, die im Rahmen des Emissionshandels unter dem Kioto-Protokoll ausgegeben werden, können nicht zur Nachweisverpflichtung im Rahmen des Emissionshandels im internationalen Luftverkehr eingesetzt werden et vice versa.
- ? Offener Emissionshandel: Emissionsrechte, die für das Emissionshandelssystem des internationalen Luftverkehrs ausgegeben werden, können ebenso beim Emissionshandel unter dem Kioto-Protokoll benutzt werden, wie die Emissionsrechte des Kioto-Protokolls für die Verpflichtungen im Rahmen des Emissionshandels im internationalen Luftverkehr eingesetzt werden können.
- ? Halboffener Emissionshandel: Da die treibhausgaswirksamen Emissionen im Flugverkehr möglicherweise nicht unmittelbar mit den im Rahmen des Kioto-Protokolls erfassten Treibhausgasen verglichen werden können, kann in Erwägung gezogen werden, dass zwar Emissionsrechte aus dem Emissionshandel unter dem Kioto-Protokoll beim Emissionshandel im internationalen Luftverkehr anerkannt werden, Emissionsrechte aus dem internationalen Luftverkehr aber umgekehrt nicht im Rahmen des Emissionshandels unter dem Kioto-Protokolls verwendet werden dürfen.²² Diese Möglichkeit kann insbesondere wegen der durchaus komplexen Klimawirksamkeit der luftverkehrsbedingten Emissionen sinnvoll sein.

Ein geschlossenes Emissionshandelssystem im Luftverkehr führt dazu, dass tatsächlich Emissionsreduktionsanstrengungen in diesem Sektor getätigt werden, da das Wachstum des Sektors direkt begrenzt wird. Ein solches System bietet einen sehr

²² Der Vorteil eines halboffenen gegenüber einem offenen System liegt darin, dass ausgehend von den Maßeinheiten der Klimawirksamkeit Kioto-Emissionsrechte eher zum Emissionshandel des Luftverkehrs zugelassen werden können als umgekehrt. Dies kann darauf zurückgeführt werden, dass das Global Warming Potential (GWP) die Klimawirksamkeit detaillierter beschreibt, als die Radiative Forcing, da beim GWP die zeitliche Dimension der Verweildauer zusätzlich zur Radiative Forcing berücksichtigt wird (Kapitel 3).

starken Anreiz zur Flugoptimierung unter klimapolitischen Aspekten, zu technischer Effizienz sowie zur Vermeidung von Flügen.

Vorteilhaft ist es, dass ein solches System unabhängig vom und parallel zum Kioto-Prozess etabliert werden kann. Die Administration wäre vergleichsweise einfach, da keine Kompatibilität mit dem Kioto-Protokoll sichergestellt werden müsste. Bedeutende Nachteile eines geschlossenen Systems im Luftverkehr liegen im Bereich der Kosteneffizienz. Die Grenzvermeidungskosten für Emissionsminderungsmaßnahmen im Luftverkehr bzw. generell im Verkehr sind verglichen mit anderen Sektoren hoch. Die Nachfrage bzw. ein Teil der Nachfrage ist bei Mittel- bis Langstreckenflügen weitgehend unelastisch, da es keine vergleichbaren Alternativ-Transportmittel gibt. Soweit die angestrebten Emissionsminderungen nicht durch technische und organisatorische Optimierungen erzielt werden, können sie nur durch Vermeidung, d.h. durch die Verminderung von Flügen erreicht werden. Aus ökonomischer Sicht müsste in einem geschlossenen System ein deutlich niedrigeres Emissionsminderungs- bzw. Stabilisierungsziel angesetzt werden als in einem offenen.

Die ICAO bzw. ihre Untergruppe, CAEP, favorisiert dagegen ausdrücklich ein offenes System. Ein offenes Emissionshandelssystem ist das deutlich effizientere Handelsregime, da genau an den Stellen der Volkswirtschaft Emissionsreduktionen stattfinden, wo sie am kostengünstigsten sind. Das Reduktionsmengenziel eines Emissionshandelssystems (Cap) kann bei einem offenen System deutlich ehrgeiziger gesetzt werden, da die Reduktionen nicht tatsächlich im Luftverkehr stattfinden müssen sondern durch den Kauf von Emissionsrechten aus den anderen Sektoren ersetzt werden können, in denen niedrigere Grenzvermeidungskosten vorliegen. Durch den intersektoralen Handel würde darüber hinaus die Liquidität des Marktes gestärkt werden (ICAO/CAEP 2000). Eine absolute Beschränkung des Flugverkehrs kann jedoch mit diesem Ansatz nicht erzielt werden.

Um ein offenes System erfolgreich etablieren zu können, müssen an der Schnittstelle zwischen dem Luftverkehr und dem Emissionshandel unter dem Kioto-Protokoll diverse Regelungen zur Vergleichbarkeit der Emissionsrechte getroffen werden, damit die Kompatibilität der Handelsregime sichergestellt werden kann (Abschnitt 4.3).

Es kann auch in Erwägung gezogen werden ein halboffenes System zu etablieren. Einbußen hinsichtlich der Effizienz eines solchen Systems sind nicht zu erwarten, wenn davon ausgegangen wird, dass der Markt des internationalen Luftverkehrs überproportional wächst und die Vermeidungspotenziale vergleichsweise gering bzw. die Grenzvermeidungskosten relativ hoch sind, so dass der Luftverkehr insgesamt mit hoher Wahrscheinlichkeit als Netto-Käufer von Emissionsrechten auftreten würde. Der internationale Flugverkehr würde dabei nicht absolut begrenzt, sondern lediglich mit den Kosten der Emissionszertifikate belastet, so dass es aufgrund der vergleichsweise

geringen Elastizität im internationalen Luftverkehr nur in begrenztem Umfang zu Vermeidungsaktivitäten kommen dürfte.²³

4.3 Ansatz

Grundsätzlich kann ein Emissionshandelssystem auf absoluten oder relativen Minderungszielen aufbauen. Im ersten Falle spricht man in der Regel von einem Cap & Trade-System. Dabei wird durch die Regierung oder durch eine internationale Vereinbarung ein absolutes Emissionsniveau vorgegeben, das nicht überschritten werden soll (Cap bzw. Minderungsziel). Über diese Menge werden Emissionsrechte ausgestellt und den nachweisverpflichteten Akteuren des Handelssystems zugeteilt. Mittels des Marktmechanismus fließen die Emissionsrechte dann dorthin, wo die spezifischen Vermeidungskosten höher sind als der Marktpreis der Emissionsrechte, so dass es letztlich zu einem Ausgleich der Grenzvermeidungskosten bei den nachweisverpflichteten Akteuren kommt.

Ebenso kann ein Emissionshandelssystem allerdings auch auf relativen Minderungszielen aufbauen. In diesem Falle spricht man in der Regel von einem Baseline & Credit-System. Dabei wird durch die Regierung oder durch eine internationale Vereinbarung eine so genannte Baseline in Form eines spezifischen Emissionswertes vorgegeben, z. B. x kg CO₂-Äquivalent pro tkm (Performance standard rate, kurz PSR). Nachweisverpflichtete Akteure, deren spezifischer Emissionswert niedriger ist als die PSR, können auf diese Weise Emissionsgutschriften generieren,²⁴ die sie an Akteure veräußern können, deren spezifischer Emissionswert über der PSR liegt. Akteure, deren spezifische Vermeidungskosten niedriger liegen als der Marktpreis für Emissionsgutschriften, werden ihre Minderungspotenziale umsetzen und die dabei generierten Emissionsgutschriften an Akteure mit vergleichsweise hohen spezifischen Vermeidungskosten veräußern, so dass es auch bei diesem Ansatz zu einem Ausgleich der Grenzvermeidungskosten kommt.

Der Vorteil des Baseline & Credit-Ansatzes besteht aus Sicht der nachweispflichtigen Akteure erstens darin, dass das Minderungsziel unabhängig ist von konjunkturellen

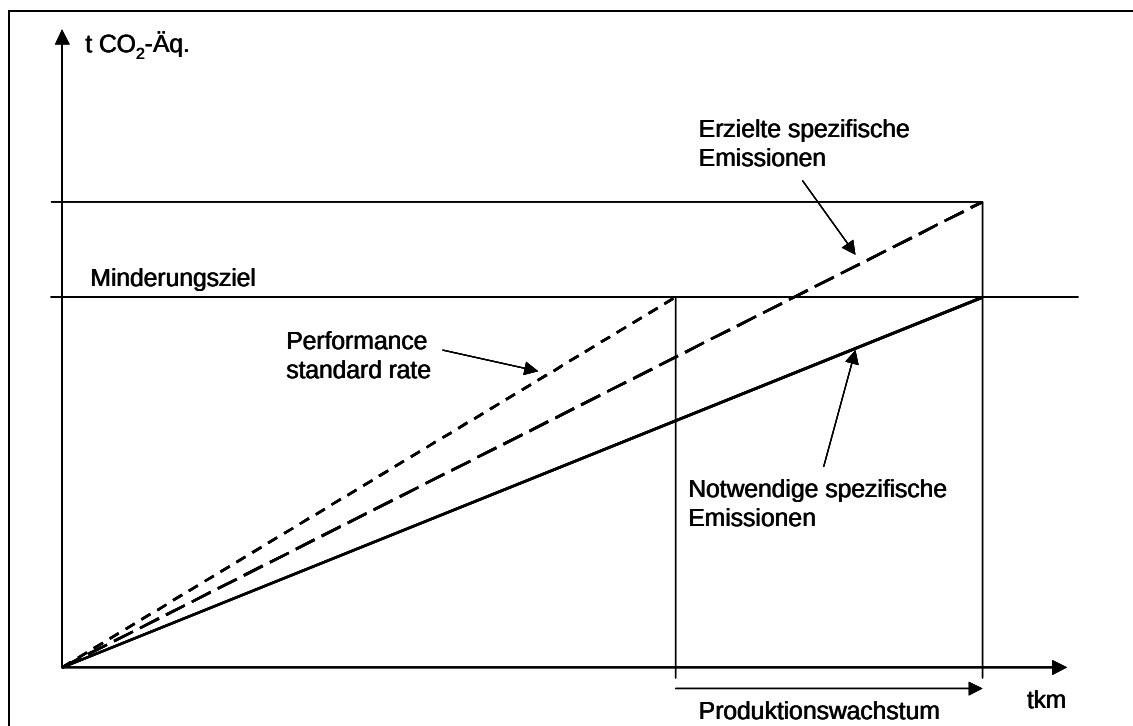
²³ Ein halboffenes System ist gewissermaßen ein „Sicherheitsventil“ für den Emissionshandel im internationalen Luftverkehr. Für den Fall, dass im Luftverkehr hinreichend kostengünstige Minderungspotenziale erschlossen werden können, ergibt sich eine Preisdifferenzierung zwischen dem „Luftverkehrsmarkt“ und dem „Kioto-Handel“. Die kostengünstigeren Emissionsrechte des Luftverkehrssektors stehen wegen der einseitigen Konvertibilität ausschließlich dem Luftverkehrssektor zur Verfügung. Sind jedoch die kostengünstigen Minderungspotenziale im Luftverkehr erschöpft und droht der Preis im Luftverkehrsmarkt über den des Kioto-Handels zu steigen, so steht den Verpflichteten des Emissionshandels im Luftverkehr der Zugriff auf die kostengünstigeren Emissionsrechte des Kioto-Handels offen. Es wird folglich sichergestellt, dass der Preis der Emissionsrechte im internationalen Luftverkehr zu keiner Zeit über dem Preis der Emissionsrechte des Kioto-Handels liegt.

²⁴ Hierfür wird die Differenz zwischen dem aktuellen spezifischen Emissionswert und der entsprechenden PSR multipliziert mit dem Aktivitätsniveau (in unserem Beispiel tkm) in der entsprechenden Nachweisperiode.

oder anderen Veränderungen im Produktionsprozess, während beim Cap & Trade-Ansatz das Ziel absolut fixiert ist und damit auch ambitionierter wird, wenn das Produktionsniveau ansteigt. Zweitens entstehen den nachweisverpflichteten Akteuren bei einem Baseline & Credit-Ansatz keine Kosten für den Erwerb von Zertifikaten sofern ihre spezifischen Emissionen unterhalb der jeweiligen PSR liegen. Im Unterschied zum Cap & Trade-Ansatz, bei dem im Falle einer Auktionierung der Emissionsrechte (Abschnitt 4.6) Kosten für jede emittierte Einheit entstehen, fallen beim Baseline & Credit-Ansatz lediglich Kosten für die Emissionen an, die oberhalb der PSR liegen.

Werden bei einem Cap & Trade-Ansatz die Emissionsrechte jedoch nicht versteigert sondern kostenlos vergeben, z.B. auf der Grundlage eines so genannten Grandfathering- oder Benchmarkingverfahrens (Abschnitt 4.6), so entstehen den Nachweisverpflichteten auch hier lediglich Kosten für die Emissionen, die über die ihnen zugeteilten Emissionsrechte hinausgehen. In dieser Hinsicht sind der Baseline & Credit- und der Cap & Trade-Ansatz also durchaus vergleichbar.

Abbildung 7: Ökologische Nachteile relativer Ziele



Quelle: Butzengeiger/Betz/Bode 2001, S. 16

Der Unterschied beider Ansätze reduziert sich damit im Wesentlichen darauf, wie Veränderungen im Produktionsvolumen berücksichtigt werden. Was aus Sicht der nachweisverpflichteten Akteure ein Vorteil des Baseline & Credit-Ansatzes ist, ist aus einer ökologischen Perspektive gleichzeitig ein Nachteil gegenüber dem Cap & Trade-Ansatz: Beim Baseline & Credit-Ansatz ist nicht sichergestellt, dass das absolute E-

missionsziel tatsächlich auch erreicht wird. Denn wenn das Produktionsvolumen entsprechend stark steigt, kann das Emissionsziel auch überschritten werden, obwohl die spezifischen Emissionen im Durchschnitt unter der vorgegebenen PSR liegen (Abbildung 7, Seite 52).

Bei einem geschlossenen Emissionshandel im internationalen Luftverkehr könnte der Baseline & Credit-Ansatz gewissermaßen als „Sicherheitsventil“ wirken, da durch diesen Ansatz sichergestellt wird, dass Produktionswachstum in Form einer steigenden Verkehrsleistung nicht durch absolute Emissionsziele begrenzt wird. Bei einem Ansatz mit absoluten Zielen würde ein Anstieg der Verkehrsnachfrage zu höheren Preisen für Emissionsrechte führen und auf diese Weise bewirken, dass die Verkehrsleistung nicht im gleichen Umfang wächst. Bei einem Baseline & Credit-Ansatz wird der Anstieg der Verkehrsleistung dagegen nicht zusätzlich begrenzt. Der Fokus der Minderungsanstrengungen läge deshalb auch vor allem bei technischen und operativen Maßnahmen. Verkehrsvermeidung und Verkehrsverlagerung würde nur in dem Umfang erfolgen, wie die technisch, operativen Maßnahmen höhere Kosten verursachen. Ein Ansatz mit einem relativen Ziel würde aber auch bedeuten, dass der Minderungsbeitrag des internationalen Luftverkehrs nicht zuverlässig prognostiziert werden kann.

Bei einem offenen Emissionshandel besteht grundsätzlich die Möglichkeit, dass Emissionsrechte aus anderen Sektoren erworben werden. Ein Anstieg der Verkehrsnachfrage würde bei bereits ausgeschöpften Minderungspotenzialen im Luftverkehrssektor folglich dazu führen, dass zusätzliche Emissionsrechte von anderen Sektoren akquiriert werden. Da der Luftverkehr zwar einen steigenden, aber immer noch geringen Anteil an den gesamten Treibhausgasemissionen hat, tritt er auf dem Markt für Emissionsrechte als Preisnehmer auf. Der Preis der Emissionsrechte wird somit durch die steigende Nachfrage aus dem Luftverkehrssektor nicht oder allenfalls sehr geringfügig beeinflusst. Ein Anstieg der Verkehrsnachfrage wird also nicht durch steigende Preise für Emissionsrechte zusätzlich gedämpft, so dass die Verkehrsleistung proportional zur Verkehrsnachfrage steigen dürfte. Ein zusätzliches „Sicherheitsventil“ wäre im Falle eines offenen oder halboffenen Emissionshandels im Luftverkehr deshalb nicht notwendig.

Da der Emissionshandel unter dem Kioto-Protokoll auf einem Cap & Trade-Ansatz beruht, dürfte im Falle eines offenen Emissionshandelssystems im internationalen Luftverkehr wohl auch für den Luftverkehr nur ein auf absoluten Zielen basierender Ansatz in Frage kommen. Denn nur hierdurch kann der Minderungsbeitrag des internationalen Luftverkehrs zur globalen Treibhausminderung verlässlich bestimmt werden. Darüber hinaus dürfte die Verknüpfung zweier auf absoluten Zielen basierenden Emissionshandelssysteme erheblich leichter fallen als die Verknüpfung eines auf relativen mit einem

auf absoluten Zielen beruhenden Ansatzes.²⁵ Mit der einfacheren Administration zweier auf einem Cap & Trade-Ansatz beruhenden Systeme fallen auch die Transaktionskosten niedriger aus, so dass dem auf absoluten Zielen beruhenden Ansatz im Luftverkehr im Falle einer offenen Ausgestaltung des Emissionshandels auch unter Effizienzgesichtspunkten der Vorzug zu geben ist.

4.4 Bemessungsgrundlage

Die Ausführungen Kapitel 3 haben verdeutlicht, dass die Wirkungszusammenhänge zwischen Emissionen des Flugverkehrs und dem Treibhauseffekt sehr komplex sind. Für die Einbeziehung des internationalen Luftverkehrs in ein Emissionshandelssystem muss deshalb zunächst eine geeignete Bemessungsgrundlage identifiziert werden, die einerseits die komplexen Ursache-Wirkungs-Zusammenhänge hinreichend präzise abbilden und andererseits operabel und mit dem internationalen Emissionshandel kompatibel sein sollte. Im folgenden Abschnitt werden verschiedene, als Bemessungsgrundlage in Frage kommende Kenngrößen bzw. Kombinationen von Indikatoren diskutiert und bewertet. Im Mittelpunkt der Betrachtung von Bemessungsgrundlagen soll die Klimawirksamkeit als globale Umweltbelastung stehen. Die lokale Luftverschmutzung, die Lärmbelastung sowie andere Umweltauswirkungen des Luftverkehrs an Flughäfen sollen hingegen weitgehend unberücksichtigt bleiben.

4.4.1 Anforderungen an eine Bemessungsgrundlage

Trotz noch bestehender, zum Teil großer Unsicherheiten bezüglich der Klimawirksamkeit der einzelnen Emissionen, wird in Anlehnung an die Methodik des Kioto-Protokolls vorgeschlagen, die Wirkung der Emissionen und deren Reaktionsprodukte als CO₂-Äquivalente zu formulieren. Während im Kioto-Protokoll die Wirkung der Treibhausgase Kohlendioxid (CO₂), Methan (CH₄), Distickoxid (N₂O), perfluorierte Kohlenwasserstoffe (PCF), die teilhalogenierten Fluorkohlenwasserstoffe (HFC) sowie Schwefelhexafluorid (SF₆) in CO₂-Äquivalenten ausgedrückt werden, reicht eine Reduktion auf diese Treibhausgase bei weitem nicht aus, die vollständige Treibhauswirkung des Luftverkehrs abzubilden. Für eine vollständige und umfassende Darstellung der Wirkung bietet es sich vielmehr an, mit Hilfe der Bezugsgröße CO₂ die Wirkung von Stickoxiden, Wasserdampf, Kondensstreifen und Partikeln auszudrücken.

Im Zusammenhang mit der Internalisierung externer Effekte verschiedener luftverkehrsbedingter Emissionen haben Brockhagen/Lienemeyer (1999) wichtige Kriterien aufgestellt: In der Bemessungsgrundlage sollen tendenziell nur Emissionen berück-

²⁵ Wie das Beispiel des britischen Emissionshandelssystems zeigt, könnte zwar grundsätzlich ein auf absoluten Zielen beruhendes System auch mit einem auf relativen Zielen beruhenden System kombiniert werden. Butzengeiger/Betz/Bode (2001, S. 17f) weisen allerdings darauf hin, dass die Kombination beider Ansätze die Komplexität des Gesamtsystems erheblich erhöht und darüber hinaus zusätzliche Preis- und Mengenunsicherheiten für die Handelsteilnehmer induziert.

sichtigt werden, deren Klimaeffekt signifikant ist (Relevanzkriterium). Dadurch soll gewährleistet werden, dass nur die wirklich relevanten Wirkungen des Luftverkehrs berücksichtigt werden. Der Strahlungsantrieb soll außerdem monoton mit der Emissionsmenge des Stoffes zunehmen, so dass eine Verminderung der Emission zur Verminderung des Klimaeffektes führt. Darüber hinaus ist es von Vorteil, wenn das wissenschaftliche Verständnis der Wirkungszusammenhänge ausreichend ist. Dies ist aber nach Brockhagen/Lienemeyer (1999) keine notwendige Bedingung zur Internalisierung externer Kosten.

Die verschiedenen Ansätze zur Zusammensetzung der Bemessungsgrundlage sollen anhand folgender Kriterien bewertet werden:

- ? Bei der Wahl einer Bemessungsgrundlage sollte der ökologische Lenkungseffekt in der Weise gegeben sein, dass es aus ökologischer Sicht nicht zu einer Fehlsteuerung kommt. Das heißt, dass sowohl die Klimawirksamkeit der Flugemissionen nicht durch eine Fehlsteuerung erhöht werden darf als auch, dass andere negative Umweltwirkungen des Luftverkehrs, wie beispielsweise Lärm etc. nicht aufgrund der gewählten Bemessungsgrundlage übermäßig verstärkt werden. Diese Anforderung an eine Bemessungsgrundlage kann dadurch erfüllt werden, dass sie möglichst präzise die tatsächlichen Umwelteffekte widerspiegelt.
- ? Ein weiterer Aspekt, der bei der Zusammensetzung der Bemessungsgrundlage von großer Relevanz ist, ist die Operationalisierbarkeit des Systems. Die Einflussgrößen einer Bemessungsgrundlage sollten einfach messbar bzw. abschätzbar sowie die Vorgehensweise bei Bestimmung der Bemessungsgrundlage einheitlich sein, so dass das Monitoring und die Kontrolle des Systems nicht zu aufwändig wird. Auf diese Weise werden Transaktionskosten gering gehalten und damit eine wichtige Voraussetzung für ein effizientes System geschaffen.

Bei der Wahl der Bemessungsgrundlage muss grundsätzlich die Entscheidung getroffen werden, ob eine Kompatibilität des Systems mit dem Kyoto-Protokoll angestrebt werden soll oder nicht. In Bezug auf die Ausgestaltung des Emissionshandelssystems geht dies einher mit der Frage, ob auf ein offenes oder geschlossenes Handelssystem abgezielt werden soll. Wie bereits in Abschnitt 3.3.1 ausgeführt, ist dabei zu berücksichtigen, dass der Strahlungsantrieb, der bei der Gesamtheit der luftverkehrsbedingten Emissionen ein geeignetes Maß darstellt, formal nicht mit dem Global Warming Potential, dem Maß des Kyoto-Protokolls, kompatibel ist. Folglich müsste zur Integration des Emissionshandelssystems im Luftverkehr in den Emissionshandel unter dem Kyoto-Protokoll ein „Gateway-Mechanismus“ etabliert werden, der die Äquivalenz zwischen den Maßeinheiten auch formal sicherstellt. Aus juristischer Sicht kann ein solcher Gateway-Mechanismus z.B. im Rahmen der Verhandlungen um die zweite Verpflichtungsperiode entwickelt und etabliert werden. Voraussetzung hierfür ist jedoch, dass alle Verhandlungspartner dieses Vorgehen akzeptieren und dass ein wissenschaftlicher Konsens über die zu vereinbarenden Werte des Gateway-Mechanismus erzielt werden kann.

4.4.2 Bemessungsgrundlagen im Vergleich

Ausgehend von den zuvor beschriebenen Anforderungen an eine Bemessungsgrundlage sollen nachfolgend verschiedene Alternativen skizziert und bewertet werden. Die Alternativen unterscheiden sich darin, in welchem Umfang sie die verschiedenen Emissionen des Luftverkehrs und deren Treibhausgaswirkungen berücksichtigen.

4.4.2.1 Kohlendioxid

Es gibt sowohl Gründe, die für eine Bemessungsgrundlage, die ausschließlich die CO₂-Emissionen berücksichtigt, sprechen, also auch solche, die dagegen sprechen. Dafür spricht, dass CO₂ die einzige Emission des Luftverkehrs ist, deren Wirkung auf den Treibhauseffekt unabhängig von der geographischen Position und der Emissionshöhe ist. Im Vergleich zu den anderen Emissionen des Luftverkehrs, ist die Klimawirksamkeit von CO₂ wissenschaftlich sehr gut erforscht und international anerkannt. Die CO₂-Emissionsmenge ist aufgrund der Proportionalität zum Treibstoffverbrauch sehr gut bestimmbar. Darüber hinaus kann man auf eine sehr gute Dokumentierung der CO₂-Emissionsmengen zurückgreifen, was unter Umständen bei der Primärallokation des Grandfatherings vorteilhaft ist. Diese Aspekte vereinfachen eine Operationalisierung in hohem Maße.

Hinsichtlich der Wahl der nachweispflichtigen Akteure eines Emissionshandelssystems im Luftverkehr eröffnen sich bei einer ausschließlich auf CO₂ basierenden Bemessungsgrundlage mehr Optionen, als wenn noch weitere Emissionen, wie beispielsweise Stickoxide, berücksichtigt würden. Aufgrund der Proportionalität zwischen der CO₂-Emissionsmenge und dem Treibstoffverbrauch können Akteure auf allen Stufen der Handelskette fossiler Brennstoffe (downstream bis upstream) zum Nachweis der Emissionszertifikate verpflichtet werden und nicht nur am Punkt der Emission (downstream). Da Kohlendioxid nur etwa für ein Drittel der Klimawirksamkeit des Luftverkehrs verantwortlich ist und folglich zwei Drittel nicht in dieser Bemessungsgrundlage berücksichtigt werden, wäre allerdings eine ökologische Fehlsteuerung vorprogrammiert. Bei einem geschlossenen Emissionshandel innerhalb des internationalen Luftverkehrs hält sich die Fehlsteuerung zwar noch in Grenzen, da CO₂ eine Art „Leitwirkung“ entfaltet. Mit der Verminderung des CO₂-Ausstoßes würde ebenfalls eine Reduktion anderer klimawirksamer Substanzen, wie Wasserdampf, Schwefeldioxid und Ruß einhergehen.

Bei NO_x-Emissionen sowie teilweise auch bei Kondensstreifen treten diese Synergieeffekte dagegen nicht auf. Bei der Steigerung der Treibstoffeffizienz kommt es häufig zu höheren NO_x-Emissionen (IPCC 1999).²⁶ Neue Technologien sind jedoch in der Lage, diesen Trade-off zu umgehen. Treibstoffoptimierte Flugzeuge stoßen zudem kältere Abgase aus, so dass schon in geringeren Flughöhen bzw. in wärmeren Luftschichten

²⁶ Aufgrund der physikalischen Eigenschaften eines Verbrennungsprozesses sind die Kohlendioxid- und Stickoxidemissionen unmittelbar miteinander verbunden. Versuche, die eine Emissionsart zu reduzieren, können unbeabsichtigt dazu führen, dass die anderen Emissionen ansteigen (IPPR 2000).

die Bildung von Kondensstreifen möglich ist (Schumann 2000b). Im Fall, dass lediglich CO₂ als Bemessungsgrundlage gewählt wird, erscheint es daher unerlässlich, das Emissionshandelssystem durch andere Instrumente wie beispielsweise strikte NO_x-Standards oder eine Begrenzung der Flughöhe zu ergänzen, damit die unerwünschten Anreizwirkungen kompensiert oder zumindest begrenzt werden.

Bei einem *offenen* Emissionshandel, bei dem Emissionsrechte zwischen dem internationalen Luftverkehr und dem Emissionshandelssystem unter dem Kioto-Protokoll gehandelt werden können, führt die Nichtberücksichtigung der Begleitemissionen von Kohlendioxid zu einer sehr hohen ökologischen Fehlsteuerung. In einem offenen Regime, bei dem der Luftfahrtsektor voraussichtlich aufgrund der hohen Vermeidungskosten und der großen Wachstumspotenziale als Netto-Käufer auftreten wird, wird Kohlendioxid keinerlei „Leitwirkung“ entfalten. Bei einem rein auf CO₂ basierten Handel kommt es trotz einer globalen Emissionsobergrenze zur Erhöhung des globalen Strahlungsantriebs (Lee/Sausen 2000), da sich die gesamte Klimawirksamkeit aufgrund der Begleitemissionen von CO₂ erhöht, wenn Emissionsrechte aus anderen Sektoren aufgekauft und für die CO₂-Emissionen des Luftverkehrs verwendet werden.

Die ökologische Fehlsteuerung in einem offenen Emissionshandel könnte nur dadurch begrenzt werden, dass die CO₂-Emissionsrechte entsprechend der Klimawirksamkeit der anderen Emissionen gewichtet werden. Denkbar wäre beispielsweise, dass Emissionsrechte aus anderen Sektoren nur zu einem Drittel angerechnet werden. Zum Nachweis verpflichtete Akteure im Luftverkehr müssten dementsprechend drei Emissionsrechte von je einer t CO₂-Äquivalent aus anderen Sektoren vorweisen, um eine t CO₂-Emissionen im Luftverkehr damit abzudecken. Dennoch wäre auch bei einem solchen Ansatz die Anreizwirkung aus klimapolitischer Sicht nicht ausreichend differenziert. Für einen angemessenen ökologischen Lenkungseffekt erscheint es unerlässlich, die Bemessungsgrundlage entsprechend der tatsächlichen Klimawirksamkeiten auszugestalten.

Die Kompatibilität mit dem Kioto-Protokoll ist bei CO₂ als alleinige Bemessungsgrundlage auf formaler Ebene einfacher zu gewährleisten, da CO₂ eines der sechs Treibhausgase des Kioto-Protokolls darstellt. Wenn CO₂ als Bemessungsgrundlage gewählt wird, entfällt auch die Notwendigkeit eines Gateway-Mechanismus, denn im Gegensatz zu den anderen klimarelevanten Emissionen des Luftverkehrs kann beim CO₂ das Maß des Global Warming Potentials angewendet werden. Die Kompatibilität des Emissionshandels im internationalen Luftverkehr mit dem Emissionshandel im Rahmen des Kioto-Protokolls ist aber nur von Bedeutung, wenn beide Systeme auch interagieren bzw. integriert sind. Bei einem geschlossenen Emissionshandel im internationalen Luftverkehr spielt die Kompatibilität mit dem Kioto-Protokoll folglich eine untergeordnete Rolle. Bei einem offenen Emissionshandelssystem bleibt allerdings die Gefahr der ökologischen Fehlsteuerung bestehen, was die faktische Kompatibilität eines solchen Systems letztlich in Frage stellt.

4.4.2.2 Kohlendioxid und Wasserdampf

Eine Bemessungsgrundlage, die sich auf Kohlendioxidemissionen und direkte Wirkungen der Wasserdampfemissionen (also ohne Kondensstreifen und Zirruswolken) bezieht, hat gegenüber einer, die sich nur auf Kohlendioxid bezieht, Vor- und Nachteile. Die Emissionsmenge kann ebenfalls sehr genau aus dem Treibstoffverbrauch bestimmt werden. Jedoch ist die Einbeziehung von Wasserdampf formal nicht kompatibel mit dem Kyoto-Protokoll, da Wasserdampf nicht zu den dort erfassten Treibhausgasen gehört. Allerdings ist die direkte Wirkung des Wasserdampfes gering im Vergleich zur indirekten Wirkung auf Kondensstreifen und Zirrusbewölkung.

Bezüglich der Akteure, die zum Nachweis der Emissionszertifikate verpflichtet werden könnten, bestehen bei dieser Bemessungsgrundlage die selben Optionen wie beim CO₂ allein (upstream bis downstream). Hinsichtlich der ökologischen Steuerungswirkung hat die Einbeziehung von Wasserdampf gegenüber der alleinigen Bemessungsgrundlage Kohlendioxid nur geringe Vorteile, da der Anteil der erfassten Treibhausgaswirkung nur um ca. 4% erhöht wird. Das Problem der ökologischen Fehlsteuerung bei einem offenen Emissionshandelssystem aufgrund der Nicht-Erfassung von NO_x-Emissionen und Kondensstreifen bleibt dabei praktisch unverändert.

4.4.2.3 Kohlendioxid, Wasserdampf, Kondensstreifen und Stickoxide

Eine Bemessungsgrundlage, die sich sowohl an den CO₂- als auch an den NO_x- und Wasserdampf-Emissionen einschließlich der Kondensstreifen als Reaktionsprodukt von Wasserdampf orientiert, hätte den Vorteil, dass mengenmäßig die gesamte derzeit wissenschaftlich quantifizierbare Klimawirksamkeit des Luftverkehrs abgebildet würde. Partikel und Aerosole bleiben unberücksichtigt, da sie sich in ihrer Wirkung aufheben. Zirruswolken bleiben im Sinne einer vorsichtigen Vorgehensweise ebenfalls unberücksichtigt, da ihr Beitrag zum durch den Flugverkehr verursachten Treibhauseffekt derzeit wissenschaftlich noch ungesichert ist.

Die Klimawirksamkeit von CO₂ und H₂O (Wasserdampf) wird bei dieser Bemessungsgrundlage direkt, die von Methan, Ozon und Kondensstreifen indirekt berücksichtigt. Das wissenschaftliche Verständnis der Ozonbildung durch NO_x-Emissionen ist ausreichend, während der Methanabbau noch nicht hinreichend wissenschaftlich erforscht ist. Auch ein Zusammenhang zwischen der Reduktion von NO_x-Emissionen und dem Rückgang des Strahlungsantriebs kann nur bei der Ozonbildung beobachtet werden. Beim Methanabbau besteht dagegen aufgrund des abkühlenden Effektes eine umgekehrte Proportionalität zwischen Emissionsmenge und Strahlungsantrieb. Wegen des insgesamt erwärmend wirkenden Gesamteffektes ist dennoch eine Einbeziehung der NO_x-Emissionen möglich. Die Unsicherheit des Teilaspektes Methanabbau kann vor dem Hintergrund ohnehin nur geschätzter Schäden toleriert werden.

Erschwert wird die Einbeziehung von Stickoxiden zusätzlich durch die Abhängigkeit der Ozonbildung von der geographischen Breite bzw. der bereits vorhandenen Stickoxid-Konzentration (Hintergrundkonzentration) und der Flughöhe. Wie bereits im Abschnitt 3.2 erläutert, ist der Strahlungsantrieb durch Ozon in den nördlichen mittleren Breiten-

graden erheblich höher als in der südlichen Hemisphäre. Des Weiteren gibt es Hinweise darauf, dass inhomogen verteilter Strahlungsantrieb klimawirksamer ist als homogen verteilter (AE 2000), so dass Anreize zur Vermeidung von NO_x-Emissionen in der nördlichen Hemisphäre in Betracht gezogen werden könnten. Gegen eine stärkere Belastung der Flüge in den mittleren nördlichen Breitengraden spricht allerdings die Tatsache, dass die Zunahme von Ozon bzw. des Strahlungsantriebs von Ozon pro NO_x-Emissionsmenge in den Tropen deutlich höher ausfällt, als in Gebieten mit einer relativ hohen NO_x-Hintergrundkonzentration wie in der nördlichen Hemisphäre (AE 2000).

Aufgrund dieser wissenschaftlichen Erkenntnisse bezüglich der regionalen Variabilität der NO_x-Wirkung, aber auch aus Gründen der Operationalisierbarkeit ist die Berücksichtigung regionaler Aspekte von NO_x in der Bemessungsgrundlage schwierig. Es wird daher bei dieser Bemessungsgrundlage vorgeschlagen, einen globalen Durchschnittswert für den Strahlungsantrieb der NO_x-Emissionen zu verwenden.

Da die Klimawirksamkeit der NO_x-Emissionen stark von der atmosphärischen Zusammensetzung in der Troposphäre und Stratosphäre abhängt, spielt auch die Flughöhe in Bezug auf die Emissionswirkung eine wichtige Rolle. Die Abhängigkeit der Emissionswirkung von der atmosphärischen Zusammensetzung ist jedoch sehr komplex. Daher wird vorgeschlagen bei Einbeziehung der NO_x-Emissionen in die Bemessungsgrundlage einen durchschnittlichen Wert bezüglich der Klimawirksamkeit von NO_x-Emissionen in der Troposphäre und Stratosphäre anzunehmen.

Aus klimapolitischer Sicht erscheint die Einbeziehung von Kondensstreifen in die Bemessungsgrundlage dringend notwendig. Denn durch die Vermeidung von Höhenschichten oder Regionen, in denen mit hoher Wahrscheinlichkeit Kondensstreifen gebildet werden, können kostengünstige verhaltensbedingte Reduktionspotenziale erschlossen werden. Auch wenn nach neuesten wissenschaftlichen Erkenntnissen die Klimawirksamkeit von Kondensstreifen nicht mehr so hoch ist wie vom IPCC (1999) angenommen, kann durch die Vermeidung von Kondensstreifen teilweise die Bildung der luftverkehrsbedingten Zirruswolken verhindert werden kann. Da letztere tendenziell eine sehr hohe Klimawirksamkeit aufweisen, könnte durch die Vermeidung von Kondensstreifen eine beträchtliche Reduzierung der Klimawirksamkeit des Luftverkehrs erreicht werden. Darüber hinaus wird nach Schätzungen des IPCC der Strahlungsantriebsfaktor von Kondensstreifen in den nächsten Jahrzehnten überproportional wachsen. Dies kann unter anderem darauf zurückgeführt werden, dass die Erhöhung der Treibstoffeffizienz zwischen 1992 und 2050 um 30% dazu führt, (IPCC 1999), dass die luftverkehrsbedingten Wasserdampfemissionen geringere Temperaturen bzw. eine höhere relative Feuchtigkeit aufweisen (Schumann 2000b). Dadurch erhöht sich die Wahrscheinlichkeit der Bildung von Kondensstreifen, da schon bei geringerer Eissättigung Kondensstreifen entstehen und das Auftreten von Kondensstreifen in größeren Bandbreiten in der Troposphäre erfolgt.

Grundsätzlich problematisch ist bei der Einbeziehung der Kondensstreifen jedoch der derzeit immer noch bestehende Unsicherheitsbereich bei der wissenschaftlichen Quan-

tifizierung der Klimawirksamkeit. Des Weiteren kann die Bildung bzw. Vermeidung von Kondensstreifen nur individuell für jede Flugbewegung in Abhängigkeit von äußeren Faktoren vorausgesagt bzw. geprüft werden. Diese Aspekte sind tendenziell mit Transaktionskosten verbunden, so dass sie die Operationalisierbarkeit dieser Bemessungsgrundlage erschweren. Dennoch scheint es grundsätzlich möglich, eine Bemessungsgrundlage unter Berücksichtigung der Klimawirksamkeit von Kondensstreifen mit vertretbarem Aufwand auszugestalten (Abschnitt 4.4.3.4). Als Nachweisverpflichteter muss bei dieser Bemessungsgrundlage der Emittent gewählt werden, da die NO_x -Emissionsmenge stark vom Triebwerk, dem Gesamtgewicht des Flugzeugs und der Flugphase sowie die Wirkung des NO_x vom Emissionsort abhängig ist. Diese Einflussfaktoren können nur beim Emittenten plausibel ermittelt werden. Mit der Kenntnis des Treibstoffverbrauchs, des Triebwerks, des Flugzeuggewichts sowie der Flugroute kann die Emissionsmenge und ihre Klimawirksamkeit relativ gut bestimmt werden.

Eine Kompatibilität mit dem Kioto-Protokoll ist bei einem solchen System formal nicht gegeben, da Wasserdampf und Stickoxide nicht im Kioto-Protokoll erfasst sind. Abhilfe kann dadurch geschaffen werden, dass die Klimawirksamkeit der NO_x - und Wasserdampf-Emissionen auf die Bezugsgröße CO_2 bezogen und ein Gateway-Mechanismus für den Übergang vom Strahlungsantrieb zum Global Warming Potential geschaffen wird.

4.4.2.4 Kohlendioxid, Wasserdampf, Kondensstreifen, Stickoxide und Partikel

Im Vergleich zur im vorherigen Abschnitt beschriebenen Bemessungsgrundlage wird bei der Einbeziehung von Partikeln (Ruß, Sulfat), bei ungefähr gleichem ökologischen Lenkungseffekt, die Operationalisierung schwieriger. Obwohl bei einer solchen Bemessungsgrundlage im Grunde die gesamte wissenschaftlich relativ gut abgesicherte Klimawirksamkeit abgebildet wird, würde der ökologische Lenkungseffekt unwesentlich verbessert, da sich die negative und positive Wirkung der unterschiedlichen Partikelarten auf den Treibhauseffekt aufheben. Die Operationalisierung wird aber insbesondere dadurch erschwert, dass die Datenlage für Rußpartikel tendenziell schlecht ist und die Emissionsmenge nicht aus einfachen handhabbaren Größen abgeleitet werden kann. Dies ist zwar bei Sulfat möglich, aber da Sulfataerosole eine überwiegend positive Wirkung auf den Treibhauseffekt haben, besteht kein unmittelbarer Anlass, diese zu reduzieren. Eine Berücksichtigung von Partikeln in der Bemessungsgrundlage erscheint daher nicht sinnvoll.

4.4.2.5 Treibhausgase des Kioto-Protokolls

Für die Kioto-Treibhausgase als Bemessungsgrundlage spricht lediglich die formale Kompatibilität mit dem Kioto-Protokoll. Von den Kioto-Treibhausgasen sind im Luftverkehr ausschließlich Kohlendioxid und Methan von Bedeutung. Während Kohlendioxid direkt emittiert wird, haben Sekundärreaktionen von NO_x -Emissionen Einfluss auf die Konzentration des Methans in der oberen Troposphäre. Die Änderungen der Konzentration dieser Treibhausgase haben entgegengesetzte Vorzeichen, die Kohlendioxid-

konzentration erhöht sich und trägt deshalb zur Erwärmung bei, die Konzentration von Methan hingegen sinkt in Folge der Emission von Stickoxiden, so dass eine abkühlende Wirkung erzielt wird.

Diese Bemessungsgrundlage würde zu einer sehr hohen ökologischen Fehlsteuerung führen, da über die negative Wirkung des CO₂ hinaus nur die positive Wirkung der NO_x-Emissionen auf den Treibhauseffekt (Abbau von Methan), nicht aber die negative Wirkung der NO_x-Emissionen (Bildung von Ozon) berücksichtigt wird. Insgesamt bestehen bei dieser Bemessungsgrundlage Anreize mehr Stickoxide zu emittieren. Aus ökologischer Sicht erscheint diese Bemessungsgrundlage nicht adäquat, da sie insgesamt zu einer Erhöhung der Klimawirksamkeit führt. Die Kompatibilität mit dem Kioto-Protokoll, die auf den ersten Blick den einzigen Vorteil dieser Bemessungsgrundlage darstellen könnte, wird aus den gleichen Gründen wie bei CO₂ auf der Ebene der Operationalisierung stark relativiert. Angesichts der extrem großen Gefahr der ökologischen Fehlsteuerung und der höheren Komplexität gegenüber der Bezugsemission CO₂ erscheint diese Bemessungsgrundlage nicht angemessen.

4.4.2.6 Eignung der Bemessungsgrundlagen

Die Diskussion der Bemessungsgrundlagen hinsichtlich der ökologischen Steuerungswirkung, der Kompatibilität mit dem Kioto-Protokoll und hinsichtlich der Operationalisierbarkeit hat gezeigt, dass letztlich nur zwei der diskutierten Optionen für eine Bemessungsgrundlage ernsthaft in Erwägung gezogen werden können. Demnach sollten beim Emissionshandelssystem für den internationalen Luftverkehr entweder nur die CO₂-Emissionen (Abschnitt 4.4.2.1) oder, bei einem umfassenderen Ansatz, die CO₂-, H₂O- und NO_x-Emissionen einschließlich ihrer treibhausgaswirksamen Reaktionsprodukte Kondensstreifen, Ozon (O₃) und Methan (CH₄) berücksichtigt werden (Abschnitt 4.4.2.3). In Tabelle 3 (Seite 62) sind die wesentlichen Aspekte der beiden engeren Alternativen für eine Bemessungsgrundlage noch einmal im Überblick dargestellt.

Die Wahl der Bemessungsgrundlage ist also nicht unabhängig von anderen Gestaltungsoptionen des Emissionshandelssystems. Von besonderer Bedeutung ist, ob der Emissionshandel im internationalen Luftverkehr geschlossen oder offen ausgestaltet werden soll. In einem offenen Emissionshandelssystem für den internationalen Luftverkehr sollte, wegen der möglichen Fehlsteuerung bei der Beschränkung auf die CO₂-Emissionen als Bemessungsgrundlage, unbedingt die kompliziertere und aufwändigere, aber auch umfassendere Bemessungsgrundlage gewählt werden. Im Falle eines geschlossenen Emissionshandels innerhalb des internationalen Luftverkehrs kann dagegen durchaus auf die einfachere Variante zurückgegriffen werden, obwohl hier nur ein Teil der Treibhausgaswirkung des Luftverkehrs erfasst wird.

Tabelle 3: Vergleich ausgewählter Bemessungsgrundlagen

Kriterien zur Beurteilung	Bemessungsgrundlage	
	CO ₂	CO ₂ , H ₂ O, NO _x (inkl. Kondensstreifen)
Bemessungsgrundlage ist formal kompatibel mit dem Kyoto-Protokoll	Ja	Nein, nur mit Gewichtung und Gateway-Mechanismus
Anteil der erfassten Klimawirkung	17-56% (je nach Klimawirksamkeit der Zirruswolken)	30-100% (je nach Klimawirksamkeit der Zirruswolken)
Wirkung ist wissenschaftlich abgesichert	ja	Nein, z.T. unsicher
Emissionswirkung ist abhängig von geographischem Ort und Flughöhe	Nein	Ja
Parameter zur Bestimmung der Emissionen	Treibstoffverbrauch	Treibstoffverbrauch, Triebwerk, Gewicht, Flugroute
Dokumentation der Emissionen ist vorhanden	Ja	Ja, für Kondensstreifen aber nicht in Vergangenheit
Mögliche emissionsrechts-pflichtige Akteure	Upstream bis downstream	Nur downstream
ökologischer Lenkungseffekt	positiv	CO ₂ , Ruß, H ₂ O
	negativ	SO ₂ , Trade-Off mit NO _x , mit Kondensstreifen und teilweise Zirruswolken
Handelsbedingte Fehlsteuerung	offenes System	Luftverkehr als Käufer erhöht Klimawirkung trotz globalem Cap
	geschlossenes System	keine
Notwendigkeit zusätzlicher Instrumente zur Reduktion der Klimawirksamkeit des internationalen Luftverkehrs	Ja z.B. NO _x -Standard oder Flughöhenlimits	Nein

Quelle: Eigene Zusammenstellung

4.4.3 Bestimmung der Emissionsmengen

In Abhängigkeit von der ausgewählten Bemessungsgrundlage müssen Verfahren festgelegt werden, mit denen die Emissionsmengen der einzelnen klimawirksamen Gase bzw. die Entstehung von Reaktionsprodukten hinreichend genau bestimmt werden können. Die Bestimmung der Emissionsmengen ist dabei zunächst für die Kontrolle des Emissionshandelssystems von Bedeutung. Denn nur wenn eindeutig bestimmt werden kann, wie viele Emissionen ein zum Nachweis von Emissionsrechten verpflicht-

teter Akteur verursacht hat, kann auch festgestellt werden, ob die Pflichten erfüllt oder nicht erfüllt wurden.

Da die dem Emissionshandelssystem unterliegenden Akteure die Kontrolle der Pflichterfüllung jedoch antizipieren, müssen auch diese ihre Emissionsmengen kontinuierlich bestimmen, damit sie ihr Verhalten und ihre Investitionsentscheidungen entsprechend der Anreizwirkungen des Emissionshandelssystems ausrichten können. Für die Verpflichteten des Emissionshandelssystems ist ein klarer Bezug zur Klimawirksamkeit ihrer Emissionen deshalb ebenso entscheidend, wie eine konsistente und transparente Methode zur Bestimmung der Emissionsmengen (Brockhagen/Lienemeyer 1999).

Für den Fall, dass die Emissionsrechte kostenlos auf der Grundlage historischer Emissionen (Grandfathering) oder mit Hilfe von so genannten Benchmarks vergeben werden sollen, müssen die treibhausgaswirksamen Emissionsmengen und ihre Reaktionsprodukte ebenfalls für zurückliegende Jahre bestimmt werden können. Sofern dies nachträglich aufgrund unzureichender Datenverfügbarkeit nicht mehr möglich ist, müssen Verfahren gefunden werden, mit denen die historischen Werte abgeschätzt oder nach anderen Prinzipien verteilt werden können.

Bisher war es nicht möglich bzw. sehr aufwändig, die Mengen der einzelnen klimarelevanten Emissionen während einer Flugbewegung direkt zu messen. Die kontinuierliche Erfassung der Emissionsmengen während des Fluges würde deshalb sehr hohe Transaktionskosten verursachen. In den folgenden Abschnitten sollen deshalb Verfahren beschrieben werden, mit denen die einzelnen Emissionsmengen und ihre Reaktionsprodukte aus bekannten bzw. sowieso erfassten Größen unter Rückgriff auf international vereinbarte Standardwerte bestimmt werden können.

4.4.3.1 CO₂- und Wasserdampfemissionen

Die Mengen der CO₂- und Wasserdampfemissionen können unabhängig vom Lastzustand mit Hilfe der stöchiometrischen Verbrennungsrechnung ermittelt werden. Pro kg verbrannten Kerosins werden demnach 3,155 kg CO₂ und 1,237 kg Wasserdampf emittiert (UNFCCC/SBSTA/1996/9/Add.2).

Bei einem Upstream-Ansatz müssten die Treibstoffmengen, die an den Luftverkehr geliefert werden, bei den Verpflichteten gesondert erfasst werden. Dies erfordert in den meisten Ländern praktisch keinen Mehraufwand, da diese Mengen bereits wegen der Befreiung von der Mineralölsteuer sehr detailliert getrennt erfasst werden.

Bei einem Downstream-Ansatz stellt sich die Frage, ob der tatsächliche Treibstoffverbrauch gemessen oder ob ein berechneter Durchschnittswert in Abhängigkeit von Flugzeug, Triebwerk und Flugroute zu Grunde gelegt werden soll. Ein standardisiertes Verfahren mit international anerkannten triebwerksspezifischen und streckenabhängigen Treibstoffverbrauchswerten²⁷ würde die Überwachung des Systems erheblich ver-

²⁷ Entsprechende Verzeichnisse mit triebwerksspezifischen und streckenabhängigen Verbrauchskennwerten werden bereits heute von den Triebwerkherstellern bzw. der ICAO geführt.

einfachen. Für Durchschnittswerte spricht weiterhin, dass sie den Fluggesellschaften mehr Planungssicherheit geben. Die Fluggesellschaften würden nicht für einen Mehrverbrauch an Treibstoff durch äußere Einflussfaktoren wie z.B. Wettereinflüsse oder Warteschleifen über Flughäfen zur Rechenschaft gezogen. Grundsätzlich können mit den heute verfügbaren Daten²⁸ die CO₂- und H₂O-Emissionen nicht nur für aktuelle Flugbewegungen sondern auch für alle Flüge in einem vergangenen Basisjahr oder in einer vergangenen Basisperiode bestimmt werden.

Demgegenüber würde bei exakter Messung des Treibstoffverbrauchs gewährleistet, dass tatsächlich die gesamten entstehenden CO₂- und Wasserdampfemissionen berücksichtigt werden. Eine solche detaillierte Messung entspricht dem Verursacherprinzip und ist aus ökologischer Sicht wünschenswert.

Obwohl aus rein ökonomischen Gründen die Anreize zur Minimierung des Treibstoffverbrauchs jederzeit, also auch bei der Anwendung standardisierter Durchschnittswerte bestehen, wird in der Praxis nicht unbedingt immer die treibstoffminimierte Flugweise gewählt.²⁹ Die exakte Messung des Treibstoffverbrauchs würde diesem Verhalten entgegenwirken, führt aber auch zu tendenziell höheren Überwachungskosten. Darüber hinaus könnten bei der Allokation nur Emissionsdaten zukünftiger Flugbewegungen zu Grunde gelegt werden, da bislang der exakte Treibstoffverbrauch einzelner Flüge statistisch nicht erfasst wurde.

Letztendlich muss hier also eine Abwägung zwischen einem verbesserten ökologischen Lenkungseffekt und tendenziell höheren Überwachungskosten erfolgen.

4.4.3.2 NO_x-Emissionen

Die NO_x-Emissionsmengen sind insgesamt schwieriger zu bestimmen, da sie stark vom Triebwerkstyp und vom Lastzustand des Triebwerks abhängig sind. Generell ist die Datenlage für Emissionen im LTO-Zyklus bedeutend besser als im Reiseflug, da sie im Zusammenhang mit lokalen Umweltbelastungen an Flughäfen bereits ausführlich untersucht worden sind. Für den LTO-Zyklus kann auf die Engine Exhaust Emission Data Bank der ICAO (1995), kurz „ICAO-Datenbank“ zurückgegriffen werden. In ihr werden spezifische Informationen aller Düsentriebwerken mit einer Schubkraft von über 26,7 kN zusammengefasst, die seit 1983 zugelassen sind. Auch wenn es für die Cruise-, Climb- und Descent-Phase bislang auf internationaler Ebene keine von der ICAO anerkannten Daten gibt, können sie ebenfalls in guter Näherung auf Grundlage des Triebwerkstyps bzw. der Triebwerk-Flugzeug-Kombination, des Startgewichts sowie der Flugdistanz abgeschätzt werden.

Für die Bestimmung der NO_x-Emissionen gibt es verschiedene Methoden (IPCC 1999, Abschnitte 7.7.2 und 7.7.3). Mit Korrelationsmethoden ist eine Berechnung auf Basis

²⁸ Daten der Fluggesellschaften, der Flughäfen, von der IATA (World Air Transport Statistics), der ICAO sowie Statistiken der Flugsicherung z.B. Daten von Eurocontrol.

²⁹ Insbesondere die Fluggeschwindigkeit wird oft hinsichtlich der Flugdauer und nicht hinsichtlich des Treibstoffverbrauchs optimiert.

von Druck und Temperatur bei gegebenem Flugzeugdesign und Triebwerk mit Fehlern kleiner als 5% möglich. Alternative einfachere Methoden basieren auf der Korrelation der Emissionen mit dem Treibstoffverbrauch eines Triebwerkes. Dazu werden Daten der offiziellen ICAO Datenbank genutzt. Der Fehler liegt hier bei 5 - 10%.

Auf Basis des Treibstoffverbrauchs haben die NASA und ANCAT³⁰ auch NO_x-Emissionsfaktoren (Emission indices NO_x, kurz EI NO_x) für die Climb-, Cruise- und Descent-Phase der 20 am meisten verbreiteten Flugzeugtypen mit Hilfe der, von der Deutschen Luft- und Raumfahrtgesellschaft entwickelten, halbempirischen *Fuel Flow Method* aufgestellt. Mit Hilfe einer Zuordnungstabelle für Flugzeug- und Triebwerkstypen (AEIG 2001b) lassen sich die NO_x-Emissionen einer Vielzahl von Flugbewegungen in Abhängigkeit von Distanzklassen relativ gut bestimmen (IPCC 2000, S. 267). Die Emissionsfaktoren können dann aus Tabellen abgelesen werden. Tabelle 4 zeigt beispielhaft die NO_x-Emissionsfaktoren für zwei weit verbreitete Flugzeugtypen.

Tabelle 4: Ausgewählte NO_x-Emissionfaktoren für die Berechnung der NO_x-Emissionen auf Grundlage des Treibstoffverbrauchs

Standarddistanz			125	250	500	750	1.000	1.500	2.000	2.500	3.000	3.500
		Nautical Miles km	232	463	926	1.389	1.852	2.778	3.704	4.630	5.556	6.482
A 310												
Treibstoffverbrauch	kg		2.811	3.900	5.990	8.081	10.172	14.533	18.982	23.699	28.675	33.764
LTO	kg		1.541	1.541	1.541	1.541	1.541	1.541	1.541	1.541	1.541	1.541
Climb/Cruise/Descent	kg		1.270	2.359	4.450	6.541	8.632	12.992	17.441	22.159	27.135	32.223
NO _x -Emissionsfaktor												
LTO	g/kg Treibstoff		15,1	15,1	15,1	15,1	15,1	15,1	15,1	15,1	15,1	15,1
Climb/Cruise/Descent	g/kg Treibstoff		23,7	20,8	14,5	13,5	13,1	12,8	12,3	12,3	12,5	12,7
B 737 400												
Treibstoffverbrauch	kg		1.603	2.268	3.613	4.960	6.303	9.188	12.168			
LTO	kg		825	825	825	825	825	825	825			
Climb/Cruise/Descent	kg		778	1.443	2.787	4.135	5.477	8.362	11.342			
NO _x -Emissionsfaktor												
LTO	g/kg Treibstoff		10,1	10,1	10,1	10,1	10,1	10,1	10,1			
Climb/Cruise/Descent	g/kg Treibstoff		12,2	10,7	10,3	9,8	9,5	9,3	9,4			

Quelle: AEIG 2001b

Für jede Distanzklasse wird der Treibstoffverbrauch während des LTO-Zyklus sowie der Climb-, Cruise- und Descent-Phase angegeben. Darüber hinaus werden die durchschnittlichen Emissionsfaktoren für die einzelnen Distanzklassen aufgeführt. Zur Berechnung der NO_x-Emissionen eines konkreten Fluges wird zunächst die Distanzklasse gewählt, die dem realen Flug am ehesten entspricht. Der durchschnittliche NO_x-Emissionsfaktor wird anschließend mit dem Treibstoffverbrauch der jeweiligen Flugphase multipliziert. Diese Vorgehensweise wird auch vom Wissenschaftlichen Beirat für Globale Umweltfragen zur Berechnung einer Emissionsabgabe für den Flugverkehr vorgeschlagen (WBGU 2002).

³⁰ Expert Group on Abatement of Noise Caused by Air Transportation, eine Expertengruppe innerhalb der European Civil Aviation Conference.

Da sich die Emissionsfaktoren zwischen den Distanzklassen nur um maximal 20% unterscheiden, beträgt die Ungenauigkeit bei diskreten Distanzklassen im schlimmsten Fall 10%. Unter Berücksichtigung der Ungenauigkeit bei der Bestimmung der NO_x-Emissionsfaktoren über die Treibstoffverbrauchsmethode wächst der maximale Fehler auf 20% (Brockhagen/Lienemeyer 1999).

Für die Einführung eines Emissionshandelssystems im Luftverkehr sollten die NO_x-Emissionsindizes insgesamt weiter entwickelt werden, indem u. a. auch die Abhängigkeit der Emissionsindizes vom Triebwerkstyp berücksichtigt wird und somit allgemein die Unschärfe der Indizes minimiert wird.

Da die von der ANCAT ermittelten Standardwerte bisher noch nicht international anerkannt sind, könnten diese gegebenenfalls von den nachweisverpflichteten Akteuren (z.B. den Fluggesellschaften) in Frage gestellt werden. Dieses Problem könnte dadurch behoben werden, dass von den nachweispflichtigen Akteuren auch niedrigere Emissionsfaktoren angesetzt werden können, wenn sie entsprechende, von Dritten verifizierte Nachweise vorlegen. Im Fall der freien Vergabe von Emissionsrechten ist aber darauf zu achten, dass diese Nachweise vor der Durchführung der Primärallokation eingereicht werden, damit sowohl bei der Allokation der Emissionsrechte als auch beim Nachweis der Pflichterfüllung dieselben Emissionsfaktoren angewendet werden. Diese Vorgehensweise hätte darüber hinaus den Vorteil, dass damit sukzessive eine Datenbank mit verifizierten Emissionsfaktoren aufgebaut wird, auf die in späteren Verpflichtungsperioden zurückgegriffen werden kann. Er kann sowohl für aktuelle als auch für Flugbewegungen in einem zurückliegenden Basisjahr bzw. einer zurückliegenden Basisperiode angewendet werden. Gleichzeitig wird die Datenmenge durch die Beschränkung auf mehrere Entfernungsklassen gering gehalten und damit – trotz niedriger Transaktionskosten – ein wirksamer ökologischer Lenkungseffekt erzielt.

4.4.3.3 Kondensstreifen

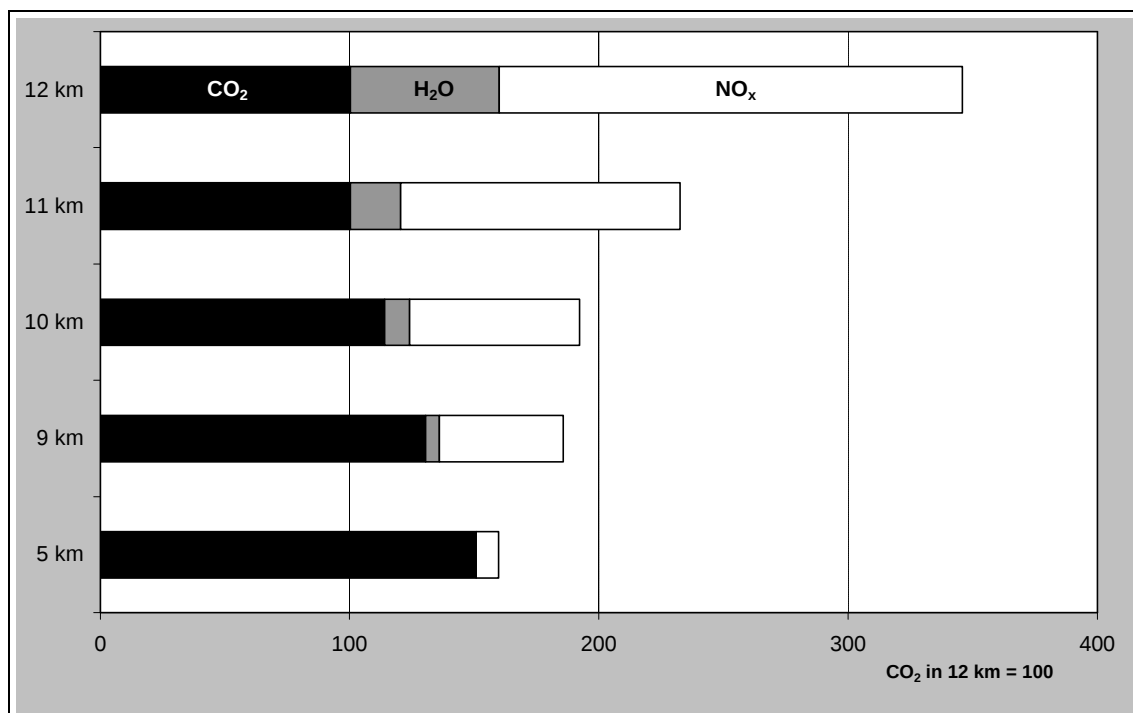
Während bei Kohlendioxid und Wasserdampf lediglich direkte Emissionsmengen bestimmt werden, müssen bei der Bestimmung von Kondensstreifen, die in einer Sekundärreaktion entstehen, auch andere Einflussfaktoren berücksichtigt werden. Neben den Emissionen von Wasserdampf, Sulfat und Partikeln ist die Entstehung von Kondensstreifen insbesondere von der Temperatur und der Feuchtigkeit abhängig. Da durch numerische Wettervorhersagen diese Faktoren heutzutage für die ganze Welt im voraus bestimmt werden können, kann die Bildung von Kondensstreifen akkurat vorausgesagt werden. Für den Militärflug in Europa und USA werden derzeit aus Sicherheitsgründen die Flughöhen, in denen mit hoher Wahrscheinlichkeit Kondensstreifen entstehen, schon standardmäßig bestimmt (Sausen 2002).

Brockhagen (1996) geht davon aus, dass die atmosphärischen Schichten, in denen Kondensstreifen auftreten, normalerweise nicht dicker als 500 Meter sind. Wenn Fluggesellschaften es vermeiden durch diese Schichten zu fliegen, kann die Bildung von Kondensstreifen weit gehend reduziert werden. Nach Angaben der Deutschen Flugsicherung (Lindenmayer 2002) ist eine Änderung des Fluglevels in dieser Größenord-

nung keine Seltenheit. Die Flugsicherung hat jederzeit die Möglichkeit in Abhängigkeit von der Wetterlage eine Änderung des Fluglevels anzuordnen. Eine weit gehende Vermeidung bestimmter Fluglevel, d.h. Höhen in denen vorzugsweise Kondensstreifen auftreten, ist grundsätzlich immer möglich, wenn die Verkehrsdichte dies zulässt.

Bei Ausweichreaktionen können jedoch unter Umständen Trade-offs mit anderen klimawirksamen Emissionen auftreten. Brockhagen/Lienemeyer (1999) gehen davon aus, dass bei 500 m niedrigeren oder höheren Flügen der Treibstoffverbrauch und die CO₂-Emissionen um ca. 2% und NO_x-Emissionen um 5% ansteigen. Bei NO_x-Emissionen in niedrigeren Flughöhen ist die Klimawirksamkeit jedoch trotz der etwas höheren spezifischen Emissionsmenge geringer (Grewe 2002). Abbildung 8 zeigt die relative Klimawirksamkeit von CO₂-, H₂O- und NO_x-Emissionen in Abhängigkeit von der Emissionshöhe.³¹

Abbildung 8: Relativer Treibhauseffekt in Abhängigkeit von der Flughöhe



Quelle: IPCC 1999

Trotz der höheren CO₂- und NO_x-Emissionen bei Flügen in niedrigeren Fluglevels sinkt die gemeinsame Klimawirksamkeit dieser Emissionen. Ein Absenken des Fluglevels zur Vermeidung von Kondensstreifen führt zwar zu absolut höheren CO₂- und NO_x-Emissionen, nicht jedoch zu einer höheren Klimawirksamkeit dieser Emissionen. Im Gegenteil, durch die verringerte Treibhausgaswirksamkeit von NO_x in niedrigeren Flug-

³¹ Die Wirkung von Kondensstreifen bleibt bei dieser Darstellung unberücksichtigt.

levels können die zusätzlich entstehenden CO₂-Emissionen vollständig kompensiert werden. Da dieser Effekt jedoch im Vergleich zu dem durch die Vermeidung von Kondensstreifen erzielbaren Effekt vergleichsweise gering ist, kann er im Sinne einer vorsichtigen Vorgehensweise bei der Erfassung der Minderungseffekte vermiedener Kondensstreifen zunächst vernachlässigt werden.

Es bestehen mehrere Möglichkeiten, die Kondensstreifen in die Bemessungsgrundlage einzubeziehen. Wenn man nur die Wasserdampfemissionen (gegebenenfalls auch die Sulfat- und Partikelemissionen) berücksichtigt, würde daraus eine in Abhängigkeit vom Treibstoffverbrauch durchschnittliche gleiche Belastung aller Flugbewegungen resultieren. Alternativ könnten nur diejenigen Flugbewegungen belastet werden, bei denen tatsächlich mit hoher Wahrscheinlichkeit Kondensstreifen entstehen, d.h. die äußeren Faktoren würden einbezogen werden. Erstere Möglichkeit wird in Brockhagen/Lienemeyer (1999) im Rahmen eines Abgabensystems für den Luftverkehr vorgeschlagen. Bei der Entwicklung eines Emissionshandelssystems erscheint es aber für eine angemessene Anreizwirkung unerlässlich, die Wahrscheinlichkeit der Kondensstreifenbildung einzubeziehen. Denn auf diese Weise kann man Anreizwirkungen schaffen, die den tatsächlichen Klimawirksamkeiten annähernd gerecht werden. Für diesen Ansatz wird auf die Erkenntnisse und Modellrechnungen von CE (2002a, 2002b) zurückgegriffen.

Tabelle 5: Global durchschnittlicher Strahlungsantrieb des Flugverkehrs mit und ohne Auftreten von Kondensstreifen

Strahlungsantrieb		Durchschnittlicher Flug mit Kondensstreifen bei 10% der Flugdauer	Situation ohne Kondensstreifen (90% der Flugdauer)	Situation mit Kondensstreifen (10% der Flugdauer)
CO ₂	W/m ²	+0,018	+0,0162	+0,0018
O ₃ (durch NO _x)	W/m ²	+0,023	+0,0207	+0,0023
CH ₄ (durch NO _x)	W/m ²	-0,014	-0,0126	-0,0014
H ₂ O	W/m ²	+0,002	+0,0018	+0,0002
Kondensstreifen (Mix aus H ₂ O, SO ₂ und Ruß)	W/m ²	+0,0035	+0,0000	+0,0035
Zirruswolken	W/m ²	0 bis +0,075	+0,0000	0 bis +0,075
SO ₂	W/m ²	-0,003	-0,0027	-0,0003
Russ	W/m ²	+0,003	+0,0027	+0,0003
Total (ohne Zirruswolken)	W/m²	+0,033	+0,0261	+0,0064
Flugleistung (1992)	Mrd. km	20,70	18,63	2,07
spezifischer Strahlungsantrieb (ohne Zirruswolken)	picoW/m²/km	+1,6	+1,4	+3,1

Quelle: CE 2002a, eigene Berechnungen

CE (2002b) beschreibt spezifische Bedingungen, unter denen Kondensstreifen entstehen. Bei Berücksichtigung von Feuchte, Temperatur, Flughöhen und Flugrouten kommt er zu dem Ergebnis, dass es während etwa 10% der weltweit aggregierten Flugzeit zur Bildung von persistenten Kondensstreifen kommt. Im Gegensatz zu anderen Umweltauswirkungen ist die Bildung von Kondensstreifen ungeachtet der Flugzeuggröße

hauptsächlich von der Flugdauer abhängig. Unter der Annahme, dass die Flugdauer proportional zu den geflogenen Kilometern ist, sind 10% der Flugkilometer verantwortlich für den Strahlungsantrieb durch Kondensstreifen.

Das Konzept von CE (2002a) unterscheidet deshalb für die Berechnung externer Kosten des Flugverkehrs zwischen der Situationen mit und ohne Bildung von Kondensstreifen. Tabelle 5 (Seite 68) zeigt die Ergebnisse unter Berücksichtigung der neuesten wissenschaftlichen Erkenntnisse.

Unter der Annahme einer Proportionalität zwischen Flugdauer und zurückgelegter Strecke ist der Strahlungsantrieb eines geflogenen Kilometers mit Kondensstreifen (+3,1 picoW/m²) gut doppelt (2,2 mal) so groß wie der eines Flugkilometers ohne Kondensstreifen (+1,4 picoW/m²). Dieser Faktor gilt für durchschnittliche auf dem Markt befindliche Flugzeuge. Für Maschinen mit mehr Treibstoffverbrauch, also für alte oder große Maschinen ist der Faktor kleiner, für kleine oder treibstoffeffiziente Flugzeuge ist er größer als 2,2.

Betrachtet man einen durchschnittlichen Flugkilometer, bei dem es zu Kondensstreifenbildung kommt, ist der Strahlungsantrieb der Kondensstreifen (+0,0035 W/m²) um knapp das zweifache größer als der Strahlungsantrieb des CO₂ (+0,0018 W/m²). Durchschnittliche Flugzeuge emittieren etwa 22 kg CO₂ pro Flugkilometer (IPCC 1999, S. 302). Der zusätzliche Strahlungsantrieb der Kondensstreifen pro geflogenem km entspricht damit dem Strahlungsantrieb von etwa 42,8 kg CO₂ (1,94 x 22 = 42,78).

Für die Bewertung der Klimawirksamkeit eines Flugkilometers mit Kondensstreifenbildung wird nach der Methode von CE (2000a) vorgeschlagen, die Klimawirksamkeit zunächst ohne Kondensstreifen zu berechnen und anschließend die Klimawirksamkeit zu addieren, die der Emission von 42,8 kg CO₂ pro km entspricht.

Tabelle 6: Datenverfügbarkeit der Parameter zur Bestimmung von Kondensstreifenindizes nach der Wahrscheinlichkeitsmethode

Parameter	Datenverfügbarkeit
Meteorologische Daten (Feuchte, Temperatur in Flughöhe)	Numerische Wettervorhersage
Flughöhe	Aus Triebwerk und Distanzklasse abzuleiten
Flugroute	Auch für die Berechnung von NO _x Emissionsfaktoren notwendig
Triebwerk (Abgastemperaturen)	Auch für die Berechnung von NO _x Emissionsfaktoren notwendig
Wasserdampf-Emissionen	Aus Treibstoffverbrauch berechenbar

Quelle: Eigene Darstellung

Weil nicht während jedes Fluges die Kondensstreifenbildung gemessen und dokumentiert werden kann, ist eine Unterscheidung nach Situationen mit und ohne Kondensstreifen nur sinnvoll, wenn festgestellt werden kann, bei welchen Flügen Kondensstreifen in welchem Maße auftreten. Dafür ist die Entwicklung von spezifischen Wahrscheinlichkeitsfaktoren für Kondensstreifen analog zu den NO_x-Emissionsfaktoren der

ANCAT notwendig. Mit Hilfe dieser Faktoren kann die Wahrscheinlichkeit der Kondensstreifenbildung in Abhängigkeit von der Flugroute und -höhe abgebildet werden. Zu berücksichtigende Parameter sind dabei die Feuchte und Temperatur in Flughöhe, die Flugroute, die Flughöhe, das Triebwerk sowie die Wasserdampfemissionen. Tabelle 6 (Seite 69) zeigt die Datenverfügbarkeit der verschiedenen Parameter.

Numerische Wettervorhersagen erlauben heute jeder Fluggesellschaft die Vorhersage der Bedingungen während eines geplanten Fluges. Informationen über die Temperatur- und Feuchtebedingungen in Flughöhe sind daher verfügbar. Flughöhe, Flugroute und Triebwerkstyp sind aus der Berechnung der NO_x-Emissionen nach ANCAT bekannt. Die Menge an emittiertem Wasserdampf lässt sich über den Treibstoffverbrauch berechnen.

Mit dem jeweils berechneten Kondensstreifenfaktor wird dann die Wahrscheinlichkeit für das Auftreten von Kondensstreifen ermittelt. Durch Multiplikation dieses Wertes mit der Flugdistanz kann die Anzahl der Flugkilometer mit Kondensstreifenbildung berechnet werden. Für jeden dieser km erhöht sich die Nachweispflicht um 42,8 kg CO₂.

Für die systematische Erfassung von Kondensstreifen müsste ein auf numerischen Wettervorhersagen basierendes Prognose- und Überwachungssystem etabliert werden, mit dessen Hilfe die Gebiete, in denen mit sehr hoher Wahrscheinlichkeit Kondensstreifen entstehen, verlässlich vorhergesagt werden können. Durch den Abgleich dieser Daten mit der tatsächlichen Flugroute kann dann ex post auch der Anteil der Flugkilometer berechnet werden, bei denen Kondensstreifen entstanden sind und für die später entsprechende Emissionsrechte nachzuweisen sind.

Grundsätzlich denkbar wäre jedoch auch, dass die Bildung von Kondensstreifen mit Hilfe entsprechender Infrarotkameras von Satelliten in Echtzeit überwacht wird. Hierbei ist jedoch zu überprüfen, ob die technischen Voraussetzungen für die Umsetzung eines solchen System bereits bestehen und welche Kosten dabei zu erwarten sind.

Obgleich dieses Berechnungsverfahren für gegenwärtige und zukünftige Flugbewegungen eingesetzt werden kann, bleibt fraglich, ob mit diesem Verfahren auch die Klimawirksamkeit der Kondensstreifen von bereits zurückliegenden Flügen ermittelt werden kann. Da die Kondensstreifenbildung direkt von dem jeweiligen Wettergeschehen abhängig war, kann sie auch im nachhinein wohl kaum aus bestehenden Datenbeständen rekonstruiert werden.

4.4.3.4 Ermittlung der CO₂-Äquivalente

Die in den vorstehenden Abschnitten dargestellten Verfahren zur Bestimmung der Mengen von treibhausgaswirksamen Emissionen des Luftverkehrs und den Reaktionsprodukten dieser Emissionen müssen im nächsten Schritt hinsichtlich ihrer spezifischen Treibhauswirksamkeit bewertet werden. Diese Bewertung erfolgt mit Hilfe des Strahlungsantriebs der einzelnen Treibhausgase und ihrer Reaktionsprodukte und ermöglicht einen Vergleich mit CO₂ (Abschnitt 3.3.1).

Der spezifische Strahlungsantrieb der vom Luftverkehr emittierten Treibhausgase wurde bisher auf der Grundlage des globalen Strahlungsungleichgewichts des gesamten Luftverkehrs im Jahre 1992 ermittelt (Tabelle 2). Für ein Emissionshandelssystem, das nur den internationalen Luftverkehr umfasst, sollte jedoch nur das Strahlungsungleichgewicht einbezogen werden, das durch den internationalen Luftverkehr verursacht wird. Derzeit können zwar die Treibhausgasemissionen einzelner Luftverkehrskategorien (Instrumentenflug, Sichtflug, Militär) differenziert werden, nicht aber das Strahlungsungleichgewicht, da es bislang nicht separat für die einzelnen Emittentengruppe abgeschätzt bzw. modelliert wurde. Um dennoch den spezifischen Strahlungsantrieb des zivilen Luftverkehrs berechnen zu können, wird das auf diese Kategorie zurückzuführende Strahlungsungleichgewicht hier vorsichtig geschätzt. Gemäß dem Emissionsinventar der DLR für das Jahr 1992 werden 13% der CO₂- und 11% der NO_x-Emissionen durch Militärflüge verursacht (IPCC 1999). Dieser Anteil ist wegen des starken Wachstums des zivilen Flugverkehrs allerdings abnehmend. Da Militärflüge in der Regel niedriger fliegen als zivile Flugzeuge, ist die spezifische Klimawirksamkeit dieser Emissionen niedriger als bei zivilen Flügen. Im Sinne einer vorsichtigen Schätzung wird hier dennoch unterstellt, dass etwa 12% des Strahlungsungleichgewichts von Militärflügen induziert wird. Der damit ermittelte durchschnittliche Strahlungsantrieb für den zivilen Luftverkehr fällt damit etwas niedriger aus. Die hierbei in Kauf zu nehmende Unschärfe scheint im Rahmen eines Emissionshandelssystems für den internationalen Luftverkehr hinnehmbar, da sie die Treibhausgaswirkungen eher unter- als überschätzt.

Auch bei der Berechnung der Bemessungsgrundlage dürfen nur die klimawirksamen Emissionen berücksichtigt werden. CO₂-Emissionen sind über den gesamten Flugzyklus klimawirksam und sollten deshalb vollständig erfasst werden. NO_x- und Wasserdampfemissionen sind dagegen nur in der Troposphäre und Stratosphäre klimawirksam. Da für die NO_x- und Wasserdampfemissionen in der Troposphäre und Stratosphäre keine Daten verfügbar sind, wird hier vereinfachend unterstellt, dass die gesamten Emissionen der Climb-, Cruise- und Descent-Phasen klimawirksam sind. NO_x- und Wasserdampfemissionen während der LTO-Phase bleiben also unberücksichtigt.³²

³² Die Nicht-Berücksichtigung der NO_x- und Wasserdampfemissionen im LTO-Zyklus ist aus klimapolitischer Sicht konsistent, bewirkt aber auch, dass Kurzstreckenflüge, die in der Regel höhere spezifische NO_x-Emissionen aufweisen als Langstreckenflüge, dennoch geringer belastet werden als diese. Anreizwirkungen NO_x-Emissionen im LTO-Zyklus zu vermeiden gehen vom Emissionshandel für den internationalen Luftverkehr also nicht aus. Deshalb könnte hier die Flankierung des Emissionshandels für Treibhausgase mit emissionsabhängigen Landegebühren zur Vermeidung der bodennahen NO_x-Emissionen in Erwägung gezogen werden.

Unter Berücksichtigung dieser Aspekte können für das Jahr 1992 die CO₂-Äquivalente³³ von NO_x und Wasserdampf berechnet werden (Tabelle 7): eine im Reiseflug emittierte Tonne Wasserdampf entspricht demnach 3,178 t CO₂ eq. und eine Tonne NO_x entspricht 136,46 t CO₂ eq.

Tabelle 7: Ableitung spezifischer Strahlungsantriebe und CO₂-Äquivalente für das Jahr 1992

		CO ₂	H ₂ O (direkt)	NO _x
Emittierte Menge	Mio. t	413,1	145,9	1,5
Globaler Strahlungsantrieb (ohne Militär)	W/m ²	0,0158	0,0018	0,0079
Spezifischer Strahlungsantrieb	pW/m ² t	0,0383	0,0121	5,2326
Spezifischer Strahlungsantrieb	CO ₂ = 1	1,00	0,31	136,46
Emissionsmenge, die einer t CO ₂ -Äquivalent entspricht	t	1,000	3,178	0,007

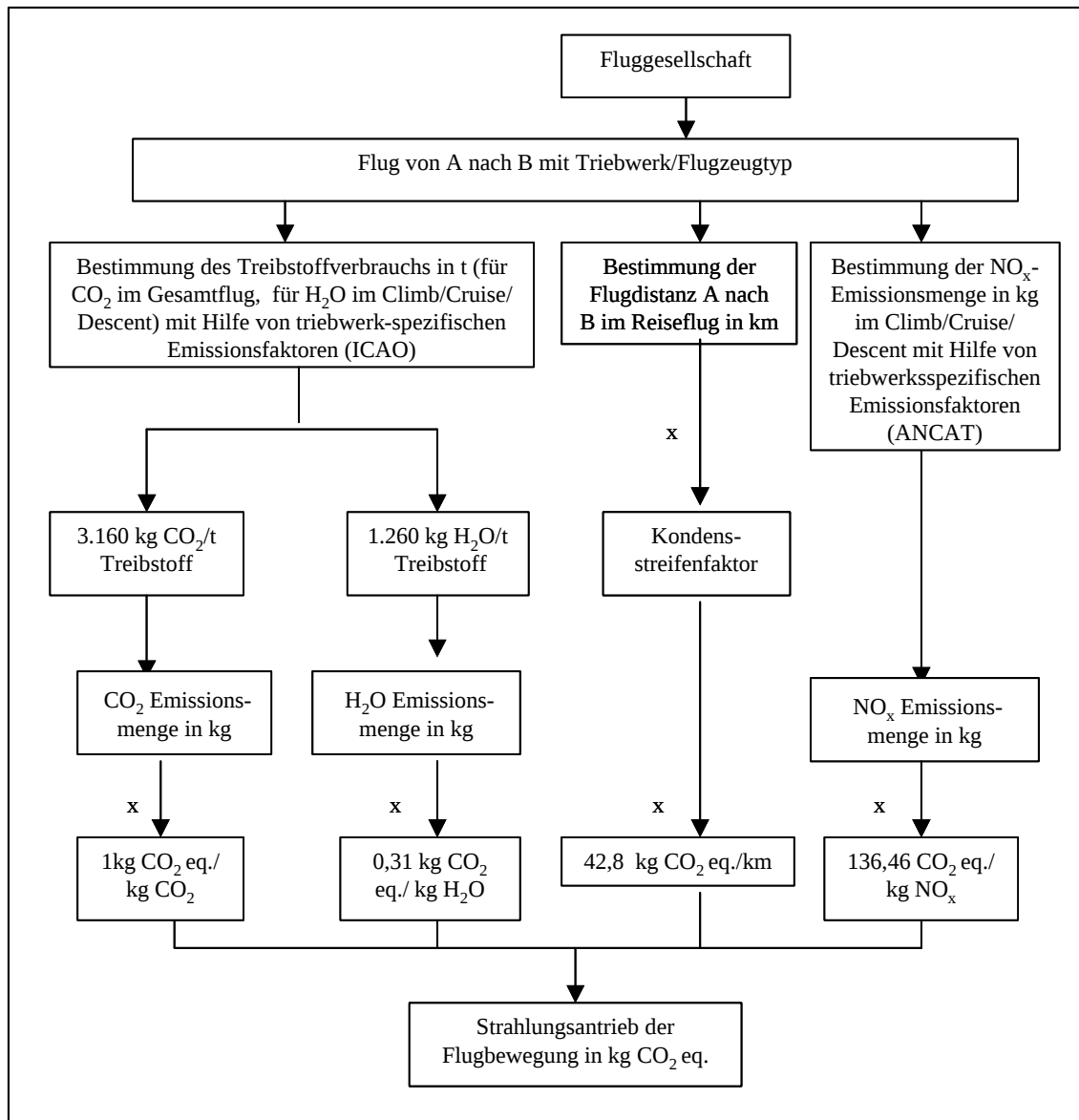
Quelle: Eigene Berechnungen; Daten: NASA 1992 ohne Militär, skaliert mit 1,15 (IPCC 1999, S.194 und 303); prozentuale Verteilung der Emissionsmengen auf LTO und Climb/Cruise/Descent im Jahr 1992: DLR 2002; Methode: CE 2002a

Durch die Ermittlung von CO₂-Äquivalenten für den internationalen Flugverkehr können die CO₂-, NO_x- und Wasserdampfemissionen miteinander in ihrer Klimawirksamkeit verglichen und addiert werden. Gleichzeitig wird hierdurch die Schaffung eines Gateway-Mechanismus für den offenen Handel mit anderen Sektoren geschaffen. Der Besitzer eines Emissionsrechtes über eine t CO₂-Äquivalent darf demnach entweder 1 t CO₂, oder 3,178 t Wasserdampf bzw. 7 kg NO_x während der Climb-, Cruise- und Descent-Phase emittieren. Die Treibhausgaswirkung von Kondensstreifen wird mittels der Flugdistanz und der vorausgerechneten Wahrscheinlichkeit für das Auftreten von Kondensstreifen berechnet. Dabei wird jeder kondensstreifenbildende Flugkilometer mit 0,24 t CO₂-Äquivalent belastet (vgl. Abschnitt 4.4.3.3).

Abbildung 9 stellt die verschiedenen Schritte für die Berechnung der Treibhauswirkungen eines Fluges in CO₂-Äquivalenten noch mal übersichtlich dar.

³³ Die hier ermittelten CO₂-Äquivalente basieren nicht auf dem Konzept des Global Warming Potentials, sondern sind über den Strahlungsantrieb der Substanzen ermittelt worden. Sie stellen ein Maß für die momentane Klimawirksamkeit der Emissionen dar. Wenn jedoch der Luftverkehr wie prognostiziert wächst und der Sensitivitätseffekt von Ozon und Kondensstreifen relativ größer ist als der Akkumulationseffekt von CO₂ (vgl. Abschnitt 3.3.1), dann stellen die hier ermittelten CO₂-Äquivalente nicht nur ein Maß für die momentane Klimawirksamkeit, sondern auch für die langfristige Änderung der Temperatur dar.

Abbildung 9: Methode zur Berechnung von CO₂-Äquivalenten für die Klimawirksamkeit des internationalen Luftverkehrs



Quelle: Eigene Darstellung

Viele der in die Berechnung der Treibhauswirksamkeit des Flugverkehrs in CO₂-Äquivalenten einfließenden Parameter sind weiterhin Gegenstand wissenschaftlicher Debatten. Die Berechnungsmethode ist dennoch belastbar, da in Zweifelsfällen immer die vorsichtigeren Parameter zu Grunde gelegt wurden, d.h. bei einer wissenschaftlich nicht abgesicherten Wirkung wurde der geringere Wert zu Grunde gelegt. Dennoch sollten die Parameter mit fortschreitender wissenschaftlicher Erkenntnis erneut überprüft und ggf. zukünftig angepasst werden.

In Tabelle 8 sind nach dieser Systematik exemplarisch die CO₂-Äquivalente für zwei Beispielflüge berechnet worden.

Tabelle 8: Exemplarische Berechnung der CO₂-Äquivalente zweier Flüge

Strecke		Berlin - New York	Berlin - Zürich
Distanz	km	5.000	1.000
Distanzklasse	nm	2.500	500
Flugzeugtyp		Airbus 310	Boeing 737 400
Triebwerk		CF6-80C2	CFM56-3B-2
Emissionen			
Treibstoffverbrauch	t	23,7	3,6
Reiseflug	t	22,2	2,8
Rest	t	1,5	0,8
Kohlendioxid-Emissionen	t	75	11
Wasserdampf-Emissionen (Reiseflug)	t	27	3
Stickoxid-Emissionen (Reiseflug)	kg	273	29
Stickoxid-Emissionsfaktor (Reiseflug)	g/kg Treibstoff	12	10
Distanz mit Kondensstreifen	%	50	0
Distanz mit Kondensstreifen	km	2.500	0
CO₂-Äquivalente	t CO₂ eq.	228	16
Kohlendioxid	t CO ₂ eq.	75	11
Wasserdampf	t CO ₂ eq.	9	1
Stickoxide	t CO ₂ eq.	37	4
Kondensstreifen	t CO ₂ eq.	107	0

Quelle: Eigene Berechnungen; Daten aus Tabelle 4 und Tabelle 7

Ein Beispielflug von Berlin nach New York mit einem Airbus 310, einem Triebwerk CF6-80C2 sowie einer angenommenen Wahrscheinlichkeit der Kondensstreifenbildung von 50% weist eine Klimawirksamkeit von ca. 228 t CO₂-Äquivalenten (0,045 CO₂-Äquivalent/km) auf. Da angenommen wird, dass bei diesem Flug Kondensstreifen auftreten, ist die Klimawirksamkeit des Fluges drei mal so groß wie die Klimawirksamkeit von Kohlendioxid allein. Dies zeigt, dass ein beachtliches Potenzial besteht die Klimawirksamkeit des Luftverkehrs zu verringern, indem Gebiete bzw. Flughöhen vermieden werden, in denen mit einer hohen Wahrscheinlichkeit Kondensstreifen gebildet werden.

Der zweite Beispielflug von Berlin nach Zürich mit einer Boeing 737 400, einem Triebwerk CFM56-3B-2 und einer Wahrscheinlichkeit der Kondensstreifen von 0% weist hingegen sowohl absolut (16,4 CO₂-Äquivalent) als auch pro Flugkilometer (0,016 CO₂-Äquivalent/km) eine deutlich geringere Klimawirksamkeit auf. Da keine Kondensstreifen gebildet werden, ist auch die gesamte Klimawirksamkeit des Fluges lediglich 1,44 mal größer als die Klimawirksamkeit der CO₂-Emissionsmenge dieser Flugbewegung.

Bei einem angenommenen Marktpreis zwischen 3 und 30 € pro Emissionsrecht für 1 t CO₂-Äquivalent müsste bei dem Beispielflug von Berlin nach New York mit einer finan-

ziellen Belastung zwischen 680 und 6.830 €, bei dem von Berlin nach Zürich mit 50 bis 500 € gerechnet werden. Bei 400 Passagieren auf dem Flug von Berlin nach New York entstünden Kosten von 1,70 und 17 € pro Passagier. Auf dem Flug von Berlin nach Zürich lägen die Kosten bei 100 Fluggästen in der Größenordnung von 0,50 bis 5 €.

4.5 Verpflichtete

Ist durch die Festlegung der Bemessungsgrundlage in Verbindung mit dem gewählten Cap (Abschnitt 4.9) bestimmt wie viele Emissionsrechte zur Verfügung stehen, so stellt sich die Frage, wer diese Emissionsrechte nachweisen muss. Der Nachweisverpflichtete unterliegt der Kontrolle der Aufsichtsbehörden. Nach Ende einer Periode muss er nachweisen, dass die vom ihm ausgestoßenen Emissionen durch eine entsprechende Menge von Emissionsrechten gedeckt ist. Die Nachweisverpflichteten sind damit auch die Akteure, die vorrangig mit Emissionsrechten handeln.

Die Auswahl der Verpflichteten eines Emissionshandelssystems ist deshalb immer eine zentrale und diffizile Frage, da sie verschiedenen – zum Teil widersprüchlichen – Kriterien genügen muss. Denn hiervon hängt einerseits ab, wie hoch die Transaktionskosten, also die Aufwendungen für Informationsbeschaffung, Monitoring, Controlling etc. des Emissionshandelssystems sind. Die Gruppe darf nicht zu groß sein, da Effizienzvorteile des Emissionshandels schnell durch die Transaktionskosten überkompensiert werden. Andererseits darf die Gruppe der Verpflichteten auch nicht zu klein sein, da sonst evtl. kein hinreichender Wettbewerb zustande kommt und neue Anbieter durch Kartellbildung vom Markt fern gehalten werden können. Weiterhin hängt hiervon ab, ob Vermeidungspotenziale umfassend erschlossen werden können. Denn wenn Akteure verpflichtet werden, die selbst die technischen und organisatorischen Vermeidungspotenziale nicht unmittelbar umsetzen können, wird auch hierdurch die Effizienz des Gesamtsystems eingeschränkt. Darüber hinaus werden durch die Wahl der Verpflichteten Verteilungsfragen gewissermaßen vorentschieden. Somit tangiert die Wahl der Verpflichteten letztlich auch die politische Akzeptanz eines Emissionshandelssystems.

Gleichzeitig ist die Wahl des Verpflichteten – gerade im Falle eines internationalen Handelssystems – sehr komplex, da Verpflichtungen auf verschiedenen Ebenen zu etablieren sind. Es stellt sich die Frage, ob die teilnehmenden Nationalstaaten völkerrechtsverbindliche Verpflichtungen eingehen, mit deren Erfüllung sie dann ggf. juristische Personen ihres Staates bevollmächtigen können. Grundsätzlich denkbar wäre aber auch, dass die juristischen Personen unmittelbar im Rahmen eines internationalen Abkommens Verpflichtungen eingehen.

Geht man davon aus, dass nur eine Gruppe ausgewählter Staaten am Emissionshandel teilnimmt und eine andere außen vor bleibt (z.B. die Entwicklungsländer), so stellt sich auch die Frage, wer und in welchem Umfang für die Emissionen von Flügen zwischen diesen Gruppen verantwortlich ist. Zudem stellt sich die Frage, worauf sich die Emissionsrechte beziehen sollen: auf den Fluggast bzw. die Fracht, auf den Flughafen, auf den Treibstoffverkauf oder auf den Flug selbst. Hierzu wurden im Rah-

men der UNFCCC schon verschiedene Optionen identifiziert, die jeweils verschiedene Vor- und Nachteile aufweisen. Und schließlich ist auch noch die Frage zu klären, welcher Akteur die Emissionsrechte nachweisen muss und damit zu einem der Hauptakteure in einem Emissionshandelssystem wird.

4.5.1 Verpflichtungsstruktur

Grundsätzlich stellt sich die Frage, wer auf internationaler Ebene zu den Emissionsreduktionen verpflichtet und bei Nichteinhaltung haftbar gemacht wird. Dabei sind prinzipiell zwei verschiedene Optionen denkbar:

- Nationalstaaten: Die Emissionsrechte können den Nationalstaaten zugewiesen werden. Diese können wiederum, genau wie im Kioto-Protokoll, juristische Personen ermächtigen, unmittelbar mit Emissionsrechten zu handeln.
- Juristische Personen: Alternativ können die Emissionsrechte auch direkt an die juristischen Personen (z. B. die Fluggesellschaften) ausgegeben werden.

Letztere Option hätte den Vorteil, dass die schwierige Frage der Allokation von internationalen luftverkehrsbedingten Emissionen an Nationalstaaten, die schon in der Vergangenheit kontrovers diskutiert wurde, umgangen werden könnte. Eine Zuteilung an die einzelnen Fluggesellschaften auf der Grundlage historischer Emissionsdaten wäre dagegen vergleichsweise einfach zu realisieren, da die Emissionen des zivilen Luftverkehrs eindeutig den einzelnen Fluggesellschaften zugeordnet werden können.

Gegen eine direkte Verteilung von Emissionsrechten sprechen jedoch eine Anzahl rechtlicher und politischer Gründe (IPPR 2000). Diese Zuordnungsmethode würde stark von der Struktur des Kioto-Protokolls sowie von der internationalen Rechtspraxis abweichen, da klimarelevante Emissionen privatwirtschaftlichen Unternehmungen und nicht Nationalstaaten zugeordnet werden. Der Flugverkehr wird jedoch ohnehin eine Sonderstellung einnehmen müssen. Zudem ist es schwierig, die Einhaltung der Verpflichtungen auf internationaler Ebene zu gewährleisten, wenn die Nationalstaaten nicht involviert sind, da sie letztlich die einzigen sind, die über die notwendige Sanktionsmacht verfügen, um solche Verpflichtungen auch durchzusetzen.

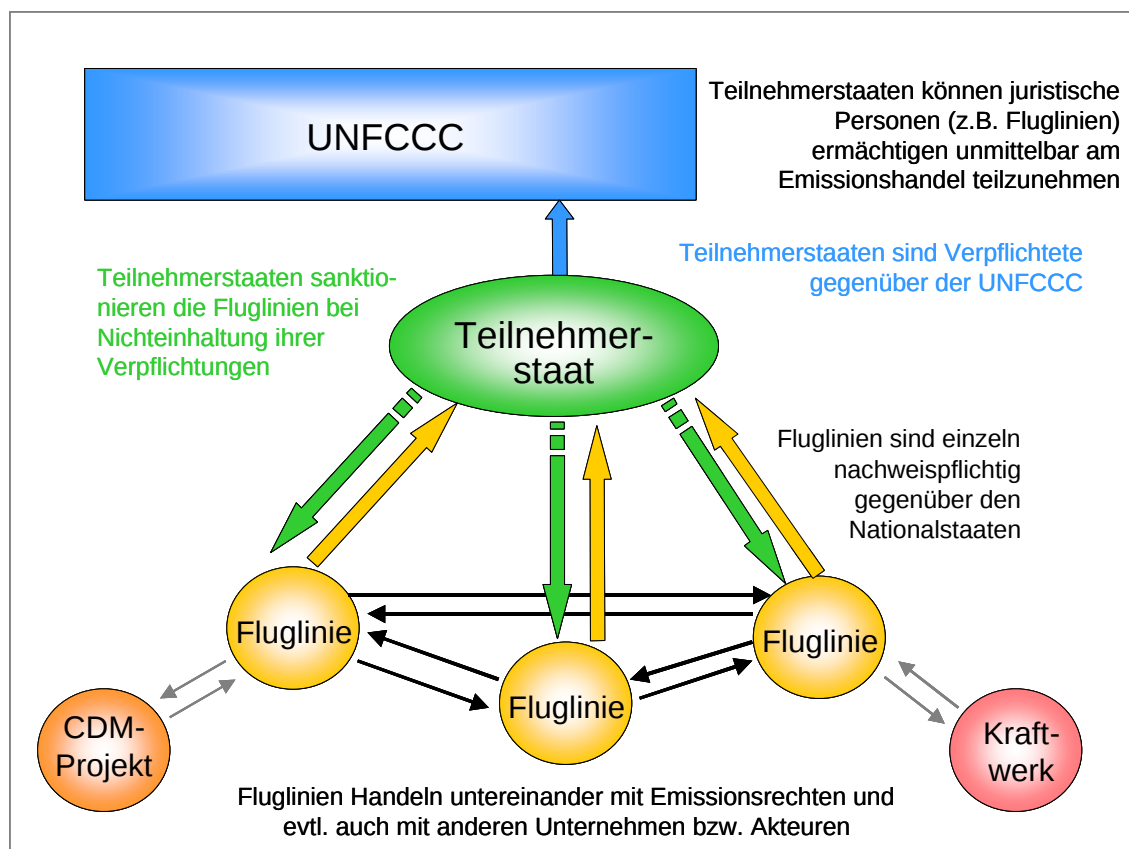
Ein weiterer Ansatz wäre, ein internationales Organ einzuschalten, dem die Verantwortung für die Verteilung der Emissionsrechte an die Fluggesellschaften und die Überwachung des Systems obliegt. Für diese Aufgabe bietet sich in erster Linie die ICAO an, da sie über breite fachliche Kompetenz im Luftverkehr verfügt. Für einen solchen Ansatz müsste jedoch geprüft werden, ob die ICAO rechtlich in der Lage ist, Sanktionen gegenüber den verpflichteten Akteuren wie z. B. den nationalen Luftfahrtunternehmen durchzusetzen.

Obgleich also eine Verpflichtungsstruktur, bei der die juristischen Personen unmittelbar einem internationalen Gremium rechenschaftspflichtig sind, theoretisch denkbar ist, dürfte die praktische Relevanz dieser Option gering sein, da sie eine hohe Interessenkonformität aller teilnehmenden Akteure erfordert. Doch selbst wenn diese Konformität

zustande kommen sollte, wirft – insbesondere bei einer Integration des Emissionshandelsystems im Luftverkehr in das Kioto-Protokoll – die Beteiligung der ICAO rechtliche Probleme auf, da sie im Gegensatz zu den Annex I-Ländern nicht Mitglied der UNFCCC bzw. Verpflichtete des Kioto-Protokolls ist. Auch ist es wenig wahrscheinlich, dass die COP die ICAO als außerordentliche Partei in das Kioto-Protokoll aufnehmen wird (IPPR 2000), in dem bisher nur Regierungen stimmberechtigt sind. Noch unwahrscheinlicher ist die Aufnahme der Fluggesellschaften selbst. Denkbar wäre ein solches Modell folglich nur im Rahmen eines geschlossenen Emissionshandels innerhalb des internationalen Luftverkehrs, bei dem es keine Verknüpfung zum Emissionshandel unter dem Kioto-Protokoll gibt.

Rechtliche und politische Gründe sprechen demnach eher für eine Allokation an Nationalstaaten. Abbildung 10 veranschaulicht die Verpflichtungsstruktur, bei der zunächst die teilnehmenden Staaten völkerrechtlich verbindliche Minderungs- oder Stabilisierungsverpflichtungen übernehmen und dann ggf. juristische Personen (z.B. Fluggesellschaften bzw. Fluglinien) ermächtigen, direkt am Emissionshandel teilzunehmen.

Abbildung 10: Vorgeschlagene Verpflichtungsstruktur



Quelle: Eigene Darstellung

Diese Verpflichtungsstruktur ist vergleichbar mit der Struktur des Kioto-Protokolls, in dem sich auch die Staaten als Vertragsparteien zu absoluten Treibhausgasminderungen oder -stabilisierungen verpflichtet haben. Gleichzeitig erlaubt das Kioto-Protokoll jedoch auch, dass juristische Personen direkt an der Nutzung der flexiblen Instrumente beteiligt werden. Dennoch sind die so ermächtigten juristischen Personen nicht gegenüber der COP rechenschaftspflichtig sondern gegenüber ihren Staaten. Transaktionen über Ländergrenzen hinweg müssen deshalb auch zwingend über die Emissionsregister (Registries) der beteiligten Länder abgewickelt werden.

Mit dieser Konstruktion wird einerseits international eine hohe Verbindlichkeit für die Emissionsreduktionen gewährleistet und andererseits aber den Vertragsstaaten im Sinne des Subsidiaritätsprinzips überlassen, mit welchen Instrumenten sie die eingegangenen Verpflichtungen erreichen. Die nationale Souveränität wird also bei dieser Vorgehensweise nicht tangiert. Keinem Land wird vorgeschrieben, mit welchem Instrument es die Verpflichtungen erreichen muss.

Denkbar wäre z. B., dass einzelne Länder sich dafür entscheiden nur selbst am Emissionshandel bzw. der Nutzung der flexiblen Instrumente teilzunehmen. Juristische Personen in diesem Lande würden dann weder Emissionsrechte erhalten noch direkt am Emissionshandel teilnehmen. Nichtsdestotrotz könnten auch Transaktionen zwischen diesen Nationalstaaten und juristischen Personen aus anderen Teilnehmerstaaten abgewickelt werden. Diese Verpflichtungsstruktur weist also erhebliche Flexibilität auf und ist bei den vermutlich stark divergierenden Interessen auf internationaler Ebene grundsätzlich am ehesten geeignet, hier einen angemessenen Ausgleich herbeizuführen.

Tabelle 9: Flugkategorien in Abhängigkeit von Nationalität der Fluggesellschaft sowie des Abflugs- und Zielorts

Flugbewegung	Herkunft der Fluggesellschaft	Flug zwischen	
		Nationalstaat A	Nationalstaat B
1	Teilnehmerstaat	Teilnehmerstaat	Teilnehmerstaat
2	Nicht-Teilnehmerstaat		
3	Teilnehmerstaat	Nicht-Teilnehmerstaat	Teilnehmerstaat
4	Nicht-Teilnehmerstaat		
5	Teilnehmerstaat	Nicht-Teilnehmerstaat	Nicht-Teilnehmerstaat
6	Nicht-Teilnehmerstaat		

Quelle: Eigene Darstellung

Bei einem Emissionshandelssystem, bei dem Verpflichtungen nur von einigen Nationalstaaten eingegangen werden, stellt sich auch die Frage, welche Flüge vom Emissionshandelssystem erfasst werden sollen und welche nicht. Denn es ist hier zu berücksichtigen, ob die Flüge zwischen den teilnehmenden Staaten erfolgen oder ob auch ein

nicht teilnehmender Staat beteiligt ist. Darüber hinaus stellt sich die Frage, ob die Erfassung im Emissionshandelssystem auch von der Nationalität der Fluggesellschaft³⁴ abhängig ist oder nicht. Tabelle 9 (Seite 78) zeigt eine Übersicht der unter Berücksichtigung dieser Aspekte möglichen Flugkategorien.

Unumstritten sind sicherlich Flugbewegung 1 und 6. Wenn ein Flug zwischen Teilnehmerstaaten erfolgt und von einer in einem Teilnehmerstaat basierten Fluggesellschaft durchgeführt wird, sollte er vom Emissionshandelssystem erfasst werden. Und ebenso ist klar, dass ein Flug zwischen zwei Nicht-Teilnehmerstaaten, der von einer Fluggesellschaft eines Nicht-Teilnehmerstaates durchgeführt wird, vom Emissionshandelssystem nicht erfasst wird.

Aber schon bei der Flugbewegung 2, also wenn der Flug zwischen zwei Teilnehmerstaaten von einer Fluggesellschaft durchgeführt wird, die in einem Nicht-Teilnehmerstaat beheimatet ist, könnte in Frage gestellt werden, ob diese Flüge erfasst werden oder nicht. Allerdings würde eine Nichterfassung von Flügen zwischen Teilnehmerstaaten, die von Fluggesellschaften aus Nicht-Teilnehmerstaaten durchgeführt werden, dazu führen, dass die Flüge von Fluggesellschaften aus Teilnehmerstaaten durch Flüge von Fluggesellschaften aus Nicht-Teilnehmerstaaten verdrängt werden. Die Fluggesellschaften aus Teilnehmerstaaten würden zudem versuchen, ihren Sitz bzw. ihre Registrierung in einen Nicht-Teilnehmerstaat zu verlegen. Letztlich würden also nur sehr wenige Flugbewegungen von einem solchen Emissionshandelssystem erfasst und das System somit ad absurdum geführt werden. Diese Überlegungen zeigen, dass Fluggesellschaften aus Teilnehmer- und aus Nicht-Teilnehmerstaaten immer gleich behandelt werden müssen, da es sonst zu massiven Verlagerungseffekten kommt, die das Emissionshandelssystem letztlich wirkungslos machen. Mit den oben getroffenen Annahmen ist es naheliegend, sowohl Flugbewegung 5 als auch Flugbewegung 6 zunächst nicht in ein Emissionshandelssystem einzubeziehen.

Zu hinterfragen ist darüber hinaus, ob Flüge, bei denen entweder Abflugort oder Zielort nicht in einem Teilnehmerstaat liegen (Flugbewegungen 3 und 4), vom Emissionshandelssystem erfasst werden sollen. Grundsätzlich kann eine partielle Verantwortung für die Treibhausgasemissionen dieser Flüge nicht abgestritten werden. Gemäß dem Verursacherprinzip sollten diese Flüge deshalb zumindest anteilig erfasst werden. Denkbar wäre etwa, dass nur Inbound- oder Outbound-Flüge erfasst werden oder aber, dass nur jeweils die Hälfte der Emissionen eines Fluges zwischen einem Teilnehmer- und einem Nicht-Teilnehmerstaat erfasst werden. Grundsätzlich könnte auch in Erwägung gezogen werden, sowohl die Emissionen der Inbound- als auch der Outbound-Flüge vollständig den Teilnehmerstaaten anzulasten. Dies würde zwar etwas über das Verursacherprinzip hinausgehen, könnte aber als Maßnahme für die Vermeidung von nicht-intendierten Ausweichstrategien von Bedeutung sein (Abschnitt 4.5.2.4).

³⁴ Nach der Chicago Convention haben Fluggesellschaften die Nationalität des Staates, in dem sie registriert sind (Chicago Convention 1944).

4.5.2 Zuordnung der Emissionen

Bei der Diskussion um die Bemessungsgrundlage wurde erörtert, welche Treibhausgase erfasst und wie sie gemessen oder berechnet werden können. Im Anschluss daran wurde diskutiert, wer grundsätzlich die Verantwortung für die Treibhausgasmissionen übernehmen könnte bzw. sollte. Offen ist jedoch noch, wie viele Emissionsrechte den einzelnen Teilnehmern am Emissionshandel zugeordnet werden sollen. Hierzu muss einerseits geklärt werden, wo die Emissionen erfasst werden und wem sie dann letztlich angelastet werden.

Beim Kioto-Protokoll wurde zur Klärung dieser Frage eine einfache und eindeutige Methode gewählt, die weit gehend unumstritten ist und hohe Akzeptanz genießt: Die Emissionen wurden dem Land zugeordnet, in dessen Territorium die Emissionen entstanden sind. Auch beim Territorialprinzip gibt es zwar Ungenauigkeiten und Ungerechtigkeiten, doch diese sind vergleichsweise gering und deshalb hinnehmbar.

Leider kann das Territorialprinzip aber nicht ohne weiteres auf den Luftverkehr³⁵ übertragen werden, da 70% der Erde von Ozeanen bedeckt sind, die keinem Nationalstaat zugeordnet sind. Abgesehen davon würde das Territorialprinzip schon bei Transitflügen an seine Grenzen stoßen, da die Emissionen bei diesen Flügen anteilig dem überflogenen Land angelastet werden müssen, was den administrativen Aufwand erheblich erhöhen dürfte.

Im Vorfeld der Konferenz von Kioto wurden im Rahmen der UNFCCC deshalb nach Alternativen zum Territorialprinzip für die Zuordnung der Emissionen im Luftverkehr gesucht.³⁶ Insgesamt acht Optionen wurden dabei identifiziert (UNFCCC/SBSTA/1996/9/Add.2):

1. Keine Zuordnung;
2. Zuordnung der Emissionen aus Bunker Fuels an die Parteien im Verhältnis ihrer nationalen Emissionen;
3. Zuordnung nach Verkaufsland der Bunker Fuels;
4. Zuordnung nach Nationalität des Transportunternehmens bzw. Sitz des Unternehmens;
5. Zuordnung nach Abflugort oder Ziel des Flugzeugs; alternativ: Aufteilung der Emissionen zwischen Abflugort und Ziel;
6. Zuordnung nach Ort des Reiseantritts bzw. Reiseziel des Passagiers oder der Fracht; alternativ: Aufteilung zwischen Ort des Reiseantritts und Reiseziel;
7. Zuordnung nach Nationalität des Passagiers bzw. des Besitzers der Fracht;

³⁵ Für den internationalen Verkehr mit Seeschiffen gilt diese Feststellung ebenso.

³⁶ Die Zuordnung der Emissionen ist sowohl in der Umsetzungsphase des Emissionshandelsystems als auch – im Falle freier Vergabe der Emissionsrechte auf der Grundlage historischer Emissionen (Abschnitt 4.6.2.2) – bei der so genannten Primärallokation von Bedeutung.

8. Zuordnung nach Entstehungsort der Emissionen.

Die zweite sowie die siebte und achte Option wurden wegen unvollständiger Erfassungsmöglichkeiten oder aufgrund der schlechten Datenlage von vorneherein verworfen. Die erste, dritte, vierte, fünfte und sechste Option wurden dagegen im Rahmen der UNFCCC-Debatte als Zuordnungsmöglichkeiten in die engere Auswahl gezogen (UNFCCC/SBSTA/1996/9/Add.2). Eine Einigung auf eine dieser Optionen konnte in der UNFCCC/ICAO-Debatte bisher noch nicht gefunden werden. Im Folgenden sollen die Vor- und Nachteile der einzelnen Optionen näher analysiert werden.

4.5.2.1 Keine Zuordnung der Emissionen

Diese Option entspricht dem Status Quo. Die CO₂-Emissionen des internationalen Luftverkehrs werden zwar in den nationalen Inventaren auf der Grundlage der national abgesetzten Treibstoffe erfasst, aber da sie weder im Basisjahr noch in der Verpflichtungsperiode berücksichtigt werden, erfolgt letztlich keine Zuordnung. Dass diese Option nicht Grundlage eines Emissionshandelssystems sein kann, ist evident, da es schlicht nichts zu handeln gäbe.

4.5.2.2 Zuordnung der Emissionen nach Verkaufsland der Bunker Fuels

Die Zuordnung der Emissionen nach dem Verkaufsland der Flugturbinenkraftstoffe (Bunker Fuels) basiert auf dem so genannten Absatzprinzip. Nach diesem Prinzip werden Import, Produktion und Export von Flugtreibstoffen in einem Nationalstaat bilanziert, wobei Lagerbestände vernachlässigt werden. Der Saldo entspricht somit dem Treibstoff, der in diesem Nationalstaat abgesetzt wurde. Diese Werte werden schon heute standardmäßig von der ICAO erfasst.

Bei diesem Zuordnungsprinzip besteht die Problematik, dass der Absatz in einem Nationalstaat nicht unbedingt dem eigentlichen Verbrauch entspricht, da „Kerosin-Tourismus“ bzw. „Tankering-Strategien“ von beträchtlicher Bedeutung sein können. Wenn nahezu alle Staaten der Erde am Emissionshandelssystem teilnehmen würden, wären solche Strategien aus ökologischer Sicht unproblematisch, da sie sich gegenseitig aufheben würden (BUWAL 2000). Wenn aber nur eine relativ kleine Teilgruppe von Staaten am Emissionshandelssystem teilnimmt, könnten sich die Verpflichteten durch Ausnutzen der zulässigen Reservemengen beim Tanken in nicht erfassten Ländern zumindest partiell der Verpflichtung zur Emissionsminderung entziehen (leakage).

Als Zuordnungsmethode für ein Emissionshandelssystem, das das Kioto-Protokoll flankieren soll und nur eine begrenzte Gruppe von Teilnehmerstaaten umfasst, ist dieses Zuordnungsverfahren aufgrund der nicht-intendierten Ausweichmöglichkeiten deshalb wohl kaum geeignet. Darüber hinaus ist diese Zuteilungsmethode ungeeignet, wenn eine Bemessungsgrundlage gewählt werden soll, die über Kohlendioxid und Wasserdampf hinausgeht, da Emissionen, die von den spezifischen Flugbedingungen abhängen (Flugzeugtyp, Turbine, Fluglevel, Witterung etc.) hierbei nicht erfasst werden können.

4.5.2.3 Zuordnung nach Nationalität des Transportunternehmens

Alternativ könnte eine Zuordnung der Emissionen nach Nationalität des Transportunternehmens bzw. Sitz des Unternehmens erfolgen. Ein solcher Ansatz der Emissionszuordnung unter Einbeziehung der Fluggesellschaften aus Nicht-Teilnehmerstaaten wird in Tsai et al. (2000) favorisiert.

Diese Art der Zuordnung wäre deshalb vergleichsweise einfach zu realisieren, weil die Emissionen des zivilen Luftverkehrs eindeutig einzelnen Fluggesellschaften zugeordnet werden können und diese wiederum eindeutig den verschiedenen Nationalstaaten. Vorteilhaft ist auch, dass die Verkehrsleistungen der einzelnen Fluggesellschaften auf internationaler Ebene schon standardmäßig von der ICAO erfasst werden (CAEP 2001, Tabelle 5). Tabelle 10 zeigt eine Übersicht der zu differenzierenden Fälle bei einer Zuteilung der Treibhausgasemissionen nach der Nationalität der Fluggesellschaft.

Tabelle 10: Zuordnung der Emissionen auf Teilnehmer- und Nicht-Teilnehmerstaaten entsprechend der Nationalität der Fluggesellschaft

Fall	Herkunft der Fluggesellschaft	Flug zwischen		Zuordnung der Emissionen
1	Teilnehmerstaat	Teilnehmerstaat	Teilnehmerstaat	Teilnehmerstaat
2	Nicht-Teilnehmerstaat			Nicht-Teilnehmerstaat
3	Teilnehmerstaat	Nicht-Teilnehmerstaat	Teilnehmerstaat	Teilnehmerstaat
4	Nicht-Teilnehmerstaat			Nicht-Teilnehmerstaat
5	Teilnehmerstaat	Nicht-Teilnehmerstaat	Nicht-Teilnehmerstaat	Teilnehmerstaat
6	Nicht-Teilnehmerstaat			keine

Quelle: Eigene Darstellung

Bei dieser Zuordnungsmethode müssten allerdings nicht nur die Fluggesellschaften der Nicht-Teilnehmerstaaten sondern auch die Staaten selbst in das System eingebunden werden, weil die Fluggesellschaften sich ansonsten durch Ausfliegen in nicht-erfasste Staaten den Minderungs- oder Stabilisierungsverpflichtungen entziehen könnten. Eine Einbindung der Nicht-Teilnehmerstaaten kommt aber aufgrund des dem Kioto-Protokoll zu Grunde liegenden Prinzips der gemeinsamen aber geteilten Verantwortung frühestens für die zweite Verpflichtungsperiode in Frage. Da jedoch auch für die zweite Verpflichtungsperiode zunächst davon auszugehen ist, dass nicht alle Entwicklungsländer verbindliche Ziele übernehmen werden, dürfte das Problem auch mittelfristig weiter bestehen.

4.5.2.4 Zuordnung der Emissionen nach Abflugort oder Ziel des Flugzeugs

Dieser Zuordnungsansatz ist am ehesten mit dem Territorialprinzip vergleichbar und scheint zudem durchaus operabel. Gemäß dem so genannten „Flugplanprinzip“ werden die Emissionen entweder vollständig dem Abflugort oder Ziel des Fluges zugeordnet.³⁷ Denkbar ist auch, dass die Treibhausgasemissionen je zur Hälfte dem Abflugort und dem Ziel zugeordnet werden. Im Falle eines Fluges zwischen einem Nicht-Teilnehmerstaat und einem Teilnehmerstaat wäre zu diskutieren, ob dem Teilnehmerstaat die gesamten Emissionen oder lediglich die Hälfte der Emissionen angelastet werden.

Vorteilhaft an dieser Zuordnungsmethode ist vor allem, dass sie auch dann umsetzbar ist, wenn nur eine kleine Gruppe, wie etwa die Annex I-Staaten, mit dem Emissionshandelssystem beginnt. Denn die nicht intendierten Ausweichmöglichkeiten der Verpflichteten sind relativ begrenzt und können durch flankierende Maßnahmen zusätzlich eingeschränkt werden. Tabelle 11 zeigt die verschiedenen Fälle, die bei dieser Zuordnungsmethode unterschieden werden können, wenn die Emissionen bei Flügen zwischen Teilnehmerstaaten aufgeteilt und bei Flügen zwischen Teilnehmer- und Nicht-Teilnehmerstaaten vollständig dem Teilnehmerstaat zugeordnet werden.

Tabelle 11: Zuordnung der Emissionen nach Abflugs- oder Zielort des Flugzeugs

Fall	Flug zwischen		Zuordnung der Emissionen		
	Nationalstaat A	Nationalstaat B			
1	Teilnehmerstaat	Teilnehmerstaat	50% Nationalstaat A		
			50% Nationalstaat B		
2	Nicht-Teilnehmerstaat	Teilnehmerstaat	100% Staat B	50% Staat B	keine
3	Nicht-Teilnehmerstaat	Nicht-Teilnehmerstaat	keine		

Quelle: Eigene Darstellung

Bei dieser Zuteilungsmethode wird nicht differenziert zwischen der Herkunft oder dem Sitz der Fluggesellschaften. Airlines aus Nicht-Teilnehmerstaaten, die zwischen zwei Teilnehmerstaaten fliegen, müssen im gleichen Umfang Emissionsrechte nachweisen wie eine Airline aus einem Teilnehmerstaat.

Partiell ausweichen könnten die Fluggesellschaften ihren Verpflichtungen allenfalls durch strategische Zwischenlandungen in Nicht-Teilnehmerstaaten. So könnte bei-

³⁷ Welche dieser beiden Alternativen gewählt wird ist letztlich unerheblich. Entscheidend ist, dass eine eindeutige Festlegung auf eine der beiden Alternativen erfolgt.

spielsweise ein Flug von Europa nach Australien zunächst in Israel und dann wieder in Indonesien zwischenlanden. Langstreckenflüge würden durch diese Strategie unterproportional belastet. Doch durch verschiedene flankierende Maßnahmen könnten diese Strategien begrenzt werden. Denkbar wäre etwa, dass Flüge mit gleicher Flugnummer unabhängig von den Zwischenstopps immer vollständig belastet werden oder dass dieses davon abhängig gemacht wird, ob mit dem gleichen Flugzeug weitergefliegen wird oder mit einem anderen. Außerdem würde die Wirkung dieser Ausweichstrategie auch durch eine hundertprozentige Zuordnung der Emissionen zum Teilnehmerstaat der Flüge zwischen Teilnehmer- und Nicht-Teilnehmerstaaten begrenzt.

Grundsätzlich sind solche Strategien aber auch durch andere Faktoren begrenzt, denn Zwischenlandungen schränken den Komfort der Fluggäste ein, so dass die Fluggesellschaften diese Taktik schon aus angebotsstrategischen Gründen nicht völlig ausreizen würden. Darüber hinaus dürfte die Anwendbarkeit dieser Ausweichstrategie z.T. auch durch Kapazitätsgrenzen auf den hierfür besonders interessanten Flughäfen eingeschränkt sein. Es besteht also die Möglichkeit der Nachweispflicht partiell durch Zwischenstoppl Logistik auszuweichen,³⁸ in der Praxis wird diese Strategie aber – insbesondere bei einer (überwiegend) kostenlosen Vergabe von Emissionsrechten – nur untergeordnete Bedeutung haben. Da die Optionen für diese Ausweichstrategie zudem mit steigender Teilnehmerzahl am Emissionshandelssystem zurückgehen, können sie mittelfristig hingenommen werden.

Darüber hinaus können bei dieser Zuordnungsmethode grundsätzlich alle Treibhausgaswirkungen eines Fluges erfasst werden. Somit bestehen hinsichtlich der Wahl der Bemessungsgrundlage – im Unterschied zur Zuordnungsmethode „Verkaufsland der Bunker Fuels“ (Abschnitt 4.5.2.2) – keine Einschränkungen, so dass auch eine Bemessungsgrundlage gewählt werden kann, die weit gehend alle Treibhausgaswirkungen eines Fluges erfasst.

Insgesamt ist also diese Zuordnungsmethode nicht nur in sich konsistent, sondern zugleich heute und auch zukünftig kompatibel mit dem Kyoto-Protokoll. Bei der Ausgestaltung eines Emissionshandelssystem für den internationalen Flugverkehr sollte sie deshalb durchaus in die engere Wahl gezogen werden.

4.5.2.5 Zuordnung nach Ort des Reiseantritts bzw. Reiseziel des Passagiers oder der Fracht

Der Unterschied zum vorstehenden Zuordnungsprinzip ist grundsätzlich relativ gering. Auch dieses Zuordnungsprinzip kommt dem Territorialprinzip des Kyoto-Protokolls durchaus nahe und es ist ebenso denkbar, dass die Treibhausgasemissionen jeweils zur Hälfte dem Ort des Reiseantritts und dem des Reiseziels zugeordnet werden. Im

³⁸ Derartige Ausweichstrategien eröffnen sich immer, wenn ein Emissionshandelssystem nur Teilsegmente (in diesem Falle eine Gruppe von Staaten) erfasst. Sie lassen sich grundsätzlich nicht vollständig verhindern und sind nicht durch die Ausgestaltung bedingt sondern systematischer Natur. Gleichwohl kann durch eine entsprechende Ausgestaltung der Umfang von Optionen zur Nutzung solcher Ausweichstrategien reduziert werden.

Unterschied zum vorstehenden Zuordnungsprinzip ist der Datenbedarf für die Implementierung und Durchführung des Emissionshandelssystems um einiges höher, weil jede Flugbewegung noch mal auf die Passagiere bzw. die einzelnen Frachten aufgeteilt werden muss. Darüber hinaus können auch bei dieser Zuordnungsmethode Aufweichstrategien der Verpflichteten nicht verhindert werden, da eine Reise ebenso wie ein Flug in Teilreisen aufgeteilt werden könnte. Naheliegender wäre das Zuordnungsprinzip allerdings dann, wenn die Nachweispflicht für Emissionsrechte unmittelbar bei Fluggästen und Frachtversendern angesiedelt würde.

4.5.3 Nachweispflichtige Akteure

In Abschnitt 4.5.1 wurde diskutiert, ob die Minderungs- oder Stabilisierungsverpflichtungen bei den am Emissionshandelssystem teilnehmenden Staaten oder unmittelbar bei den einzelnen juristischen Personen ansetzen sollte. Unabhängig davon, wie diese Frage entschieden wird, ist zu klären, welche juristischen Personen als Verpflichtete in Frage kommen, denn diese Frage ist auch von Bedeutung, wenn die teilnehmenden Staaten ihre nationalen Verpflichtungen auf juristische Personen in ihrem Lande übertragen.

Die Festlegung des Rechenschaftspflichtigen nimmt eine Schlüsselstellung in der Ausgestaltung eines Emissionshandelssystems ein. Es bestehen wichtige Wechselwirkungen zu anderen Ausgestaltungsoptionen wie Bemessungsgrundlage, Zuordnung der Emissionen, Allokation der Emissionsrechte und Verpflichtungen. Bei den nachweispflichtigen Akteuren werden Emissionen gemessen oder abgeschätzt. Die Rechenschaftspflichtigen werden durch die Verwaltung des Handelssystems erfasst und kontrolliert. Die Wahl der nachweispflichtigen Akteure beeinflusst in großem Maße die Transaktionskosten, die Effektivität und die Durchführbarkeit eines Systems.

Die Rechenschaftspflicht sollte darüber hinaus an einer Stelle ansetzen, an der die größte Einflussmöglichkeit auf Reduktionspotenziale besteht und zudem geeignete und konsistente Inventare aufgestellt werden können. Bei der Wahl der Nachweisverpflichteten sollte auch darauf geachtet werden, dass bei den jeweiligen Akteuren institutionelle Strukturen für einen Handel mit Emissionsrechten bestehen oder kurzfristig aufgebaut werden können und diese zudem mit den Strukturen des Kyoto-Protokolls kompatibel sind. Weiterhin sollte sichergestellt werden, dass das System mit nationalem und internationalem Recht in Einklang gebracht werden kann.

Damit die Liquidität des Marktes permanent gewährleistet ist, muss die Zahl der Akteure hinreichend groß sein, was bei einem offenen System jederzeit der Fall, aber bei einem geschlossenen System nicht unbedingt sichergestellt ist. Andererseits sollte die Zahl der Akteure auch nicht zu groß sein, da sonst die Kontroll- und Transaktionskosten schnell Effizienzvorteile des Emissionshandels übersteigen können.

Grundsätzlich kann die Mengensteuerung eines Emissionshandelssystems direkt bei den Emittenten ansetzen (Downstream-Ansatz) oder auch an verschiedenen Punkten der vorgelagerten Handelskette (Mid- oder Upstream-Ansatz). Bei jedem dieser Ansätze

ze werden andere Akteure verpflichtet Emissionsrechte nachzuweisen. Die Nachweispflicht könnte bei Treibstoffproduzenten und -importeuren, bei Treibstoffhändlern, bei Flughäfen, bei Fluggesellschaften oder bei Passagieren bzw. Luftfrachtversendern sowie bei Herstellern von Flugzeugen ansetzen.

4.5.3.1 Upstream-Ansatz: Treibstoffproduzenten oder -importeure

Der so genannte Upstream-Ansatz verpflichtet Treibstoffproduzenten und -importeure zum Nachweis der Emissionsrechte.³⁹ Insgesamt würden bei dieser Variante ca. 70 - 100 Akteure (UNFCCC/SBSTA 1996a) am Emissionshandel teilnehmen. Die Transaktionskosten dürften damit insgesamt recht gering ausfallen. Es ist allerdings zu bedenken, dass diese Variante nur dann gewählt werden kann, wenn Kohlendioxid oder allenfalls Kohlendioxid und Wasserdampf als Bemessungsgrundlage gewählt wird (Abschnitt 4.4.2.1). Die regional variierende Wirkung von Wasserdampf sowie die bei der Verbrennung auftretende Menge an Stickoxiden könnte allerdings bei diesem Ansatz nicht berücksichtigt werden, da der Bezug zum konkreten Flug nicht vorhanden ist.

Darüber hinaus ist zu berücksichtigen, dass im Falle einer freien Vergabe der Emissionsrechte bei diesem Ansatz so genannte Windfall Profits bei den Treibstoffproduzenten und -importeuren entstehen würden, da die Unternehmen verbrieft Geldwerte erhalten, denen keine direkte Gegenleistung gegenübersteht. Diese Geldwerte werden als Opportunitätskosten (also als nicht realisierte Einnahmen, d.h. als Einnahmen, die die Emissionsrechte bei Verkauf erzeugen würden) in das Optimierungskalkül des Unternehmens einfließen und sich durch veränderte Produktionsentscheidungen möglicherweise in den Outputpreisen niederschlagen (Cames et al. 2001). Die dadurch entstehenden finanziellen Belastungen für den Luftverkehr können nicht wie bei einer Auktionierung zurückverteilt werden, was zur Konsequenz hat, dass die politische Durchsetzbarkeit eines solchen Systems sicherlich eingeschränkt ist.

Ferner ist beim Upstream-Ansatz auch zu berücksichtigen, dass die Fluggesellschaften durch Änderungen bei der Tanklogistik im Umfang der zulässigen Mengen (Tankering-Strategien) der Verpflichtung partiell ausweichen können und so die Wirkung des Emissionshandelssystems insgesamt eingeschränkt wäre.

4.5.3.2 Midstream-Ansatz: Triebwerks- und Flugzeughersteller

Der Midstream-Ansatz setzt nicht bei der Emission (downstream) oder den vorgelagerten Produkten (upstream) an, sondern bei den Prozessen mit denen die Produkte umgewandelt werden. Im Luftverkehr könnten nach diesem Ansatz die Hersteller von Flugzeugen oder Triebwerken zum Nachweis von Emissionsrechten verpflichtet werden.

³⁹ Alternativ hierzu könnten auch die so genannten Letztveräußerer von Flugturbinenkraftstoff zum Nachweis verpflichtet werden. Da diese Option keine wesentlichen Unterschiede zur hier dargestellten Option aufweist, wird auf eine gesonderte Darstellung verzichtet.

Bei diesem Ansatzpunkt wird die Emissionsreduktion im Wesentlichen durch technologische Innovation erreicht.⁴⁰ Die Zertifikatspflicht könnte sich auf die spezifische CO₂- und NO_x-Emissionen der von ihnen produzierten Flugzeuge/Triebwerke beziehen. Da aber die absoluten Emissionsmengen außerhalb des Einflussbereichs der Triebwerk- und Flugzeughersteller liegen und im Vorfeld nur mit sehr großer Unsicherheit abgeschätzt werden können, ist bei diesem Ansatz ein absolutes Cap kaum möglich. Aufgrund der langen Lebensdauer von Flugzeugen wäre ein auf dem Midstream-Ansatz beruhendes Emissionshandelssystem zudem sehr träge, da es zunächst lediglich die neuen Flugzeuge bzw. Turbinen erfassen würde und erst sukzessive den ganzen Fahrzeugpark durchdringen würde.

Zudem können die Fluggesellschaften Treibhausgasminderungen nicht nur durch technische sondern in großem Umfang auch durch operative und organisatorische Maßnahmen erzielen, wie beispielsweise Optimierung der Flughöhe und –route und Vermeiden von Staus im Luftraum (ICAO 2002). Diese operativen und organisatorischen Minderungspotenziale werden durch diesen Ansatz nicht erfasst, da keine Anreize für einen klimaoptimierten Betrieb der Flugzeuge bzw. Turbinen gesetzt werden.

Da es weltweit nur eine geringe Zahl an Triebwerk- und Flugzeugherstellern gibt,⁴¹ die jeweils über große Marktanteile verfügen, besteht bei einem geschlossenen Midstream-Ansatz darüber hinaus die Gefahr, dass einzelne Akteure ihre Marktmacht beim Emissionshandel ausnutzen um kleinere Hersteller zu verdrängen. Eine Kompatibilität mit dem Kyoto-Protokoll ist bei diesem Ansatz praktisch kaum zu erreichen, so dass auf jeden Fall von einem offenen Emissionshandelssystem Abstand genommen werden sollte.

4.5.3.3 Downstream-Ansatz: Luftfahrtgesellschaften

Ein wesentliches Merkmal des Downstream-Ansatzes ist, dass Emissionen dort erfasst und überwacht werden, wo sie entstehen, also beim Emittenten. Im weiteren Sinne kommen als „Emittenten“ der luftverkehrsbedingten Emissionen verschiedene Zielgruppen in Frage: die Luftfahrtgesellschaften, die Passagiere bzw. Luftfrachtversender oder in abstrakter Form die Flughäfen.

Die Passagiere bzw. Luftfrachtversender sind diejenigen, die letztendlich die Nachfrage nach Luftverkehr verursachen. Ihre Einbindung in ein Emissionshandelssystem wäre nach dem Verursacherprinzip zwar wünschenswert, ist aber aus administrativen Gründen nicht sinnvoll, da die Transaktionskosten bei einem Emissionshandel zwischen so zahlreichen Akteuren deutlich über den durch den Emissionshandel erzielbaren Effizienzgewinnen liegen.

⁴⁰ Beispielsweise Optimierung von Triebwerken, Gewicht und Aerodynamik.

⁴¹ Es gibt insgesamt ca. 4 große Flugzeug- und 15 Triebwerkhersteller (AEIG 2001; Federal Office for Civil Aviation, Switzerland 2000), wobei innerhalb beider Herstellergruppen wiederum auch eine starke Marktkonzentration auf eine kleinere Untergruppe besteht.

Theoretisch denkbar wäre es auch die Nachweispflicht für Emissionsrechte bei Flughäfen anzusiedeln. Die Flughäfen wären dann aber auf die Datenbereitstellung der Fluggesellschaften angewiesen und können keinen direkten Einfluss auf die Emissionsminderung nehmen. Darüber hinaus würden deutlich mehr Handelspartner als bei Fluggesellschaften auftreten, was unter Umständen den Markt intransparenter gestalten würde.

Verschiedene Gründe sprechen deshalb für die Luftfahrtgesellschaften als nachweispflichtige Akteure. Sie haben sowohl die meisten Informationen über die Emissionen sowie die größten Einflussmöglichkeiten, Emissionen zu reduzieren. Des Weiteren kann die Emissionsmenge am ehesten bei den Fluggesellschaften überprüft werden. Unter der Berücksichtigung, dass der internationale Flugverkehr ein stark kompetitiver Markt ist, erscheint die Zahl der zivilen Fluggesellschaften von ungefähr 150 - 200 weltweit (UNFCCC/SBSTA 1996/9/Add.2) ausreichend, um auch bei einem geschlossenen Emissionshandelssystem die Liquidität des Marktes für Emissionsrechte zu gewährleisten. Die Zahl der Akteure ist andererseits auch wiederum so groß, dass eine Kartellbildung ausgeschlossen werden kann. Die bei diesem Ansatz entstehenden Transaktionskosten dürften aufgrund der geringen aber durchaus ausreichenden Zahl der Nachweisverpflichteten vergleichsweise niedrig ausfallen und damit deutlich unter den durch das Emissionshandelssystem erzielbaren Effizienzvorteilen liegen.

4.5.3.4 Vor- und Nachteile einzelner Akteure im Vergleich

Tabelle 12 (Seite 89) zeigt eine Zusammenfassung der bei einem Emissionshandelssystem im internationalen Luftverkehr für die Nachweisverpflichtung in Frage kommenden Akteure.

Insgesamt erweist sich der Downstream-Ansatz, bei dem die Luftfahrtgesellschaften zum Nachweis der Emissionsrechte verpflichtet werden, für ein Emissionshandelssystem im internationalen Luftverkehr als am geeignetsten. Er lässt hinsichtlich anderer Ausgestaltungsoptionen (z.B. Bemessungsgrundlage, Primärallokation, Handelsregime) vergleichsweise große Freiheitsgrade, weist vergleichsweise günstige Marktstrukturen auf, so dass es kaum zur Kartellbildung kommen kann und auch die Liquidität des Emissionsrechtemarktes jederzeit gesichert sein sollte und verursacht zudem noch relativ geringe Transaktionskosten.

Im europäischen Emissionshandelssystem beziehen sich die Emissionsrechte auf eine Anlage, während die Betreiber der Anlage die Rechenschaftspflichtigen sind. Es wird deshalb hier vorgeschlagen, eine vergleichbare Struktur für ein internationales System im Luftverkehr zu wählen: die Emissionsrechte beziehen sich auf die Flugbewegungen, während die Betreiber von Flügen, die Luftfahrtgesellschaften, rechenschaftspflichtig sind.

Tabelle 12: Nachweisverpflichtete im Vergleich

	upstream	midstream	downstream
Verpflichtete	Treibstoffhändler und -produzenten	Triebwerks- und Flugzeughersteller	Fluggesellschaften (Passagiere, Flughäfen)
Ansatzpunkt	Treibstoff-verbrauch	Flugzeug/ Triebwerkstechnik	Flugbewegung
Anzahl der Handelspartner	70-100 ¹⁾	Sehr gering	150-200
Möglichkeit zur Emissionsreduktion von	CO ₂ , H ₂ O	CO ₂ , NO _x , H ₂ O	CO ₂ , NO _x , H ₂ O, Kondensstreifen, teilweise Zirruswolken
Implizierte Bemessungsgrundlage	CO ₂ (und H ₂ O)	CO ₂ (evtl. NO _x und H ₂ O)	alle möglich
Primärallokation	Nur Auktionierung ²⁾	Grandfathering, Auktionierung und Hybridsysteme	Grandfathering, Auktionierung und Hybridsysteme
Kompatibilität mit Kyoto-Protokoll	möglich	nein	möglich
Handelsregime	offen oder geschlossen	geschlossen	offen oder geschlossen
Nachteile	Auktionierung notwendig	Kein Anreiz zu operationeller Emissionsvermeidung	Passagiere: hohe Transaktionskosten
Vorteile	administrativ einfach, d.h. geringe Transaktionskosten	Entwicklung von emissionsarmem Fluggerät, technologischer Fortschritt	Fluggesellschaften haben größten Einfluss auf Emissionen, Institutionelle Strukturen vorhanden
¹⁾ FCCC/SBSTA/1996/9/Add.2 ²⁾ Cames et al. 2001			

Quelle: Eigene Darstellung

4.6 Primärallokation

Bevor der Handel mit Emissionsrechten beginnen kann, müssen diese Emissionsrechte zunächst in Umlauf gebracht, d.h. an die am Emissionshandel teilnehmenden Akteure in irgendeiner Weise verteilt werden. Die Gesamtmenge der zu verteilenden Emissionsrechte ergibt sich dabei aus dem Mengenziel, das durch einen politischen Entscheidungsprozess vor der Einführung des Instrumentes festgelegt wird (Abschnitt 4.9). Somit stellt sich die Frage, wie die Menge der zur Verfügung stehenden Emissionsrechte auf die verschiedenen Akteure aufgeteilt werden soll (Allokation). Dabei sind zunächst zwei Ebenen zu unterscheiden: die Zuteilung der Emissionsrechte an die teilnehmenden Staaten (First Level Allocation) sowie die Zuteilung an einzelne juristische Personen (Second Level Allocation).

Bei der Zuteilung von Emissionsrechten können darüber hinaus drei idealtypische Allokationsverfahren differenziert werden:

- **Auktionierung:** Die Emissionsrechte werden zu Anfang einer jeden Verpflichtungsperiode versteigert und können danach frei gehandelt werden.

- Grandfathering (Lyon 1986): Die Emissionsrechte werden proportional zu den Emissionen in der Vergangenheit kostenlos zugeteilt.
- Benchmarking; Die Emissionsrechte werden auf der Grundlage eines sektorspezifischen Benchmarks (z. B. CO₂ eq./km) kostenlos zugeteilt.

Mischformen oder Kombinationen dieser idealtypischen Allokationsverfahren sind natürlich auch möglich.

Im Folgenden sollen zunächst einige Aspekte zur First und Second Level Allocation diskutiert werden. Daran schließt sich eine Auseinandersetzung mit den Allokationsverfahren und ihrer Anwendbarkeit auf den internationalen Luftverkehr an. Darüber hinaus sollen diverse zusätzliche Aspekte, die im Rahmen der Primärallokation von Bedeutung sind, erörtert und bewertet werden.

4.6.1 Ebenen der Allokation

Nachdem die am Emissionshandel im internationalen Luftverkehr teilnehmenden Länder das Mengenziel festgelegt haben,⁴² muss eine Aufteilung der Gesamtmenge auf die einzelnen Länder erfolgen (First Level Allocation).⁴³ Theoretisch zwar denkbar, aber politisch sehr unwahrscheinlich, wäre die Option, dass die teilnehmenden Länder die Emissionsrechte im Rahmen einer Auktion ersteigern. In diesem Fall wäre auch zu definieren, wozu das Aufkommen aus dieser Auktion verwendet werden soll.

Wesentlich wahrscheinlicher ist, dass die Emissionsrechte den teilnehmenden Ländern kostenlos zugeteilt werden. Denkbar wäre dabei, dass das gemeinsam vereinbarte Minderungs- bzw. Stabilisierungsziel auch für die einzelnen teilnehmenden Staaten gilt. Wenn also beispielsweise die Emissionen bis 2010 insgesamt um 10% gegenüber den Emissionen von 1990 gesenkt werden sollen, so gilt dies auch für jeden einzelnen der teilnehmenden Staaten (Proportionalprinzip). Denkbar wäre auch, dass zusätzliche Faktoren wie z. B. Leistungsfähigkeit oder Minderungspotenzial bzw. Grenzvermeidungskosten bei der Zuteilung berücksichtigt werden und im Rahmen eines politischen Verhandlungsprozesses absolute Minderungsziele für jedes der teilnehmenden Länder

⁴² Eine Reihenfolge bei der Entscheidung über Minderungsziel und Allokationsverfahren gibt es nur in der Theorie. Da beide Entscheidungen in engem Zusammenhang stehen, wird über sie auch simultan entschieden. Mit anderen Worten: ein Land wird nur dann in das Globalziel für das gesamte Emissionshandelssystem einwilligen, wenn es sein daraus abgeleitetes individuelles Ziel für akzeptabel hält.

⁴³ Für den Fall, dass der Emissionshandel im internationalen Luftverkehr ohne unmittelbare Einbindung von Staaten erfolgt (Abschnitt 4.5.1), kann die First Level Allocation entfallen und direkt eine Second Level Allocation durchgeführt werden.

definiert werden.⁴⁴ Da das Ergebnis der verhandelten Allokation kaum vorhersehbar ist, wird im Folgenden immer von einer proportionalen Verteilung der Minderungs- und Stabilisierungsziele zwischen den teilnehmenden Staaten ausgegangen.

Nachdem die absoluten Minderungs- oder Stabilisierungsziele für die einzelnen Staaten bestimmt sind, müssen die dort zur Verfügung stehenden Emissionsrechte den teilnehmenden juristischen Personen zugeteilt werden. Dabei wäre ein einheitliches Vorgehen bei der Second Level Allocation zwar zur Vermeidung von Wettbewerbsverzerrungen grundsätzlich wünschenswert, dürfte aber im Rahmen der Verhandlungen über ein internationales Abkommen zumindest auf Widerstand einzelner Staaten stoßen, da es sehr stark in die Souveränität der einzelnen Staaten eingreift. Da für die Verabschiedung supranationaler Abkommen ein Konsens aller teilnehmenden Staaten notwendig ist, wird in solchen Situationen oft auf das Subsidiaritätsprinzip zurückgegriffen, gemäß dem übergeordnete politische Einheiten nur solche Entscheidungen vornehmen sollen, zu denen untergeordnete Einheiten nicht in der Lage sind. Dass die Primärallokation zwingend auf übergeordneter Ebene und nicht in den teilnehmenden Staaten stattfinden muss, kann zumindest bezweifelt werden.

Eine abschließende Bewertung dieser Debatte ist an dieser Stelle sicherlich nicht möglich. Denn auch im Rahmen der Debatte um das Europäische Emissionshandelssystem ist diese Frage bisher noch nicht abschließend geklärt worden. Der von der EU-Kommission vorgelegte Richtlinienentwurf (COM (2001) 581) räumt den Mitgliedsstaaten große Gestaltungsspielräume für die Primärallokation ein und gibt nur relativ allgemeine Kriterien vor, wie so genannte Allokationspläne ausgestaltet werden müssen (Annex III). Dies stößt verschiedentlich auf Kritik, unter anderem im Europäischen Parlament. Dort fordert das Committee on Legal Affairs and the Internal Market for the Committee on the Environment, Public Health and Consumer Policy indirekt, dass die Primärallokation stärker harmonisiert werden müsse, indem zumindest etwa 30% der Emissionsrechte auktioniert werden (COM (2001) 581 – C5-0578/01 – 2001/0245 (COD)). Auch Stronzik/Cames (2002) weisen darauf hin, dass aufgrund der offenen Kriterien leicht Wettbewerbsverzerrungen zwischen den Mitgliedsstaaten entstehen können und dass diese durch eine harmonisiertere Vorgehensweise bei der Primärallokation verhindert werden könnte. Doch auch für den Fall, dass eine Harmonisierung der Allokationsverfahren bei Abschluss des Protokolls zum Emissionshandel im internationalen Luftverkehr nicht erreichbar ist, ist nicht unbedingt davon auszugehen, dass die Allokationsverfahren der einzelnen Länder sich sehr stark unterscheiden. Denn es

⁴⁴ Politische Verhandlungen unter Berücksichtigung von Aspekten wie Leistungsfähigkeit, Vermeidungspotenzial und Anteil an den Problemursachen waren die Grundlage für die Allokation im Rahmen des Kioto-Protokolls sowie im Rahmen des so genannten Burden Sharing Agreements der EU im Jahre 1998. Neben diesen Sachaspekten ist bei der First Level Allocation auch von Bedeutung, dass einzelne Länder zur Teilnahme am System gewonnen werden, indem ihnen weniger ambitionierte Ziele angeboten werden. Die angenommenen Ziele sind somit auch ein Indikator, wie das Umweltziel in den einzelnen Teilnehmerstaaten bewertet wird.

ist durchaus denkbar, dass im Laufe der nationalen Festlegung der Allokationsverfahren der Bedarf der Harmonisierung erkannt wird und unabhängig von der formalen Kodifizierung im Protokoll eine faktische Harmonisierung auf der Umsetzungsebene stattfindet.

4.6.2 Verfahren der Primärallokation

Unabhängig von der Primärallokation führt Emissionshandel – ein kompetitiver Markt, bei dem strategisches Verhalten ausgeschlossen ist, vorausgesetzt – immer zu einer effizienten Verwendung der Ressourcen (z. B. Weimann 1991, S. 157ff, Feess 1997, S. 533ff). Die Emissionsrechte werden also in jedem Fall für die Flüge verwendet, bei denen eine Vermeidung der Emissionen am kostspieligsten wäre. Die Primärallokation hat somit also keinen Einfluss auf die Effizienz des Systems. Allerdings hat jede Primärallokation immer auch spezifische verteilungspolitische Implikationen. Insofern ist die Wahl des Primärallokationsverfahrens eine besonders sensible Entscheidung. Denn nicht zuletzt hängt von den verteilungspolitischen Konsequenzen die Akzeptanz des gesamten Emissionshandelssystems in den betroffenen Gruppen und ggf. auch in der gesamten Bevölkerung ab.

4.6.2.1 Auktionierung

Bei der Auktionierung werden Emissionsrechte vor Beginn oder auch zu verschiedenen Zeitpunkten während der jeweiligen Verpflichtungsperiode versteigert. Die vom Emissionshandelssystem erfassten Unternehmen werden entsprechend ihrer Erwartungen und entsprechend ihrer Grenzvermeidungskostenkurve Emissionsrechte erwerben. Stellt sich nach Abschluss der Auktion heraus, dass zu viele oder zu wenig Emissionsrechte erworben wurden, so können Emissionsrechte jederzeit zugekauft oder veräußert werden.

Die entscheidenden Vorteile der Auktionierung aus theoretischer Sicht sind, dass sie einerseits dem Verursacherprinzip gerecht wird und andererseits frühzeitig ein Preissignal für die Kosten der Vermeidung von Treibhausgasen im internationalen Flugverkehr setzt. Die Unternehmen können damit jederzeit gut abwägen, ob es vorteilhafter ist, Emissionsrechte zu erwerben oder Emissionen zu vermeiden. Deshalb werden durch die Auktionierung klare und starke Anreize zur Emissionsminderung gesetzt. Darüber hinaus hat die Auktionierung zunächst keine verteilungspolitischen Implikationen innerhalb der Gruppe der vom Emissionshandelssystem erfassten Akteure.

Dies gilt allerdings nur, so lange man das bei der Auktion entstehende Aufkommen vernachlässigt. Denn wird dieses Aufkommen z. B. zur Senkung des allgemeinen Budgetdefizits verwendet, so erfolgt damit implizit eine Umverteilung von den vom Emissionshandelssystem erfassten Akteuren zu allen anderen Akteuren. Aus Sicht der erfassten Akteure wirkt der Emissionshandel damit im Grunde wie eine Steuer und stößt aufgrund der damit verbundenen Kostensteigerung in der Regel auf geringe Akzeptanz bzw. völlige Ablehnung.

Letzteres Problem könnte abgemildert werden, wenn das Aufkommen der Auktion größtenteils⁴⁵ an die erfassten Akteure zurückfließt. Entscheidend dabei ist, dass der Rückfluss unabhängig von der Aufkommensentstehung ist, da sonst die Effizienz des Handelssystems gefährdet ist. Denkbar wären z. B. eine Rückverteilung auf der Grundlage technischer Effizienzstandards oder in Form einer Senkung der Lohnnebenkosten. Der Nachteil der Rückverteilung ist jedoch, dass dabei wieder über – politisch nicht besonders einfach zu entscheidende – Verteilungsfragen debattiert werden muss.

Ferner ist zu berücksichtigen, dass eine Auktionierung der Emissionsrechte für den internationalen Luftverkehr nur dann akzeptabel erscheint, wenn auch die Emissionsrechte für den Emissionshandel unter dem Kioto-Protokoll auktioniert werden. Werden die Emissionsrechte jedoch in den übrigen Sektoren kostenlos vergeben und stattdessen im Luftverkehr versteigert, so würde dies eine deutliche Verschlechterung des Flugverkehrs im intersektoralen Wettbewerb bedeuten.

4.6.2.2 Grandfathering

Das Grandfathering zeichnet sich dadurch aus, dass die erfassten Akteure Emissionsrechte proportional zu den Emissionen in einer zurückliegenden Referenzperiode kostenlos erhalten. Ein Preissignal entsteht nicht unmittelbar bei der Allokation, sondern erst dann, wenn bei einzelnen Akteuren die zugeteilten Mengen nicht mehr mit dem aktuellen Bedarf übereinstimmen. Da jedoch zur Erreichung des Minderungsziels in der Regel weniger Emissionsrechte zugeteilt werden als gegenwärtig gebraucht werden, dürfte recht bald ein Handel mit Emissionsrechten entstehen. Unternehmen mit günstigen Grenzvermeidungskosten werden Minderungsmaßnahmen vornehmen und überzählige Emissionsrechte anbieten. Das Umsatzvolumen von Emissionsrechten innerhalb einer Verpflichtungsperiode ist dennoch im Falle einer Auktionierung erheblich höher als beim Grandfathering. Die Auktionierung dürfte deshalb auch das verlässlichere Preissignal liefern.

Aus Sicht der erfassten Akteure ist das Grandfathering deshalb so attraktiv, weil es die Besitzstände absichert. Von der Gruppe der betroffenen Akteure wird es deshalb in der Regel befürwortet und gefordert. Das Grandfathering orientiert sich also vor allem am Bestandsschutz der Emittenten, widerspricht damit jedoch grundsätzlich dem Verursacherprinzip.

Bei der Gruppe der erfassten Akteure besteht zwar Einigkeit darüber, dass die Emissionsrechte kostenlos zugeteilt werden sollen, unklar ist in der Regel jedoch, nach welchem Schlüssel das erfolgen soll. In der Regel werden hierfür die Emissionen einer oder mehrerer vergangener Perioden zu Grunde gelegt. Da sich jedoch die Anteile der einzelnen vom Emissionshandelssystem erfassten Akteure an den gesamten Emissionen in Abhängigkeit von Konjunktur, Marktanteilen, frühzeitigen Minderungsmaßnah-

⁴⁵ Das Aufkommen kann auch dazu verwendet werden, die Kosten der Implementation und Administration (Transaktionskosten) des Emissionshandelsmodells zu decken.

men etc.⁴⁶ von Jahr zu Jahr unterscheiden, impliziert die Festlegung der so genannten Basisperiode immer auch eine partielle Umverteilung innerhalb der Gruppe der erfassten Akteure.

Die Wirkung einiger Einflussfaktoren, wie z.B. Konjunktur, kann minimiert werden, wenn statt eines Basisjahres mehrere aufeinanderfolgende Jahre als Basisperiode gewählt werden. Darüber hinaus hängt von der Basisperiode ab, in welchem Umfang frühzeitige Minderungsmaßnahmen – so genannte Early Action – berücksichtigt werden. Akteure, die frühzeitig ihre Emissionen durch Investitionen in klimaschonende Technologien oder durch organisatorische Maßnahmen vermindert haben, werden auf eine weit zurückliegende Basisperiode drängen, da ihre Anstrengungen dann in stärkerem Umfang berücksichtigt werden. Akteure, die vor Einführung des Emissionshandels noch keine Anstrengungen zur Minderung ihrer Emissionen verlangt haben, werden dagegen ein spätes Basisjahr fordern, weil ihnen in diesem Fall mehr Emissionsrechte zugeteilt werden.

Die Wahl der Basisperiode kann allerdings nicht allein danach erfolgen, in welchem Umfang Early Action berücksichtigt werden sollen. Denn je weiter ein Basisjahr oder eine Basisperiode zurückliegt, desto weniger verlässlich sind in der Regel die Daten, auf deren Grundlage die Verteilungsschlüssel berechnet werden sollen. Bei der Wahl der Basisperiode muss also abgewogen werden zwischen dem Umfang an Early Action, der berücksichtigt werden soll, und der Datenverfügbarkeit für die entsprechende Periode.

Unklar ist beim Grandfathering auch, wie mit so genannten Newcomern, also mit Akteuren, die während der Basisperiode noch nicht existierten, umgegangen werden soll. Da sie während der Basisperiode nicht emittiert haben, werden ihnen auch keine kostenlosen Emissionsrechte zugeteilt. Stattdessen müssten sie ihren Bedarf vollständig am Markt für Emissionsrechte erwerben. Dies stellt eine Bevorteilung bereits bestehender Unternehmen dar und ist eine Markteintrittsbarriere für zukünftige Unternehmen. Denkbar wäre, dass z.B. 5% der zur Verfügung stehenden Emissionsrechte zurückgehalten werden, um sie an Newcomer zu vergeben. Diese würden dann bei einem durchschnittlich zehnpromzentigen Minderungsziel 90% ihres prognostizierten Bedarfs an Emissionsrechten kostenlos zugeteilt bekommen und müssten die restlichen 10% erwerben.⁴⁷ Bei einer solchen Regelung ist jedoch nicht zwangsläufig gewährleistet, dass Newcomer einen Anreiz zum Einsatz neuer Technologien haben. Darüber

⁴⁶ Auch singuläre Ereignisse wie die Anschläge in den USA am 11. September 2001 können merkliche Auswirkungen auf die Emissionen haben. Als alleiniges Basisjahr wäre deshalb das Jahr 2001 ungeeignet.

⁴⁷ Die Gründung von Tochtergesellschaften sollte nicht wie eine unabhängige Neugründung behandelt werden, da es sich dabei oft um Expansions- oder Verlagerungsstrategien etablierter Unternehmen handelt. Für derartige Marktstrategien sollten im Rahmen eines Emissionshandelssystems prinzipiell keine kostenlosen Emissionsrechte zur Verfügung gestellt werden. Allerdings wird es in der Praxis schwierig sein zwischen einer unabhängigen Neugründung und der Gründung einer Tochtergesellschaft eindeutig zu differenzieren.

hinaus erfordert dieser Ansatz eine ex-post Kontrolle, ob der prognostizierte Bedarf mit dem tatsächlichen Bedarf übereinstimmt.

Zu klären ist auch, wie im Falle des Grandfatherings mit insolventen Unternehmen und mit Fusionen bzw. Übernahmen umzugehen ist. Im Falle des Konkurses gehören die Emissionsrechte zur Konkursmasse und können vom Konkursverwalter veräußert werden. Sie ständen damit dem Markt weiterhin zur Verfügung. Nach Eröffnung des Konkursverfahrens sollten Unternehmen jedoch keine weiteren Emissionsrechte zugeteilt werden. Fusionen und Übernahmen während der Umsetzung des Emissionshandels sind insofern kein größeres Problem, als dem fusionierten Unternehmen zukünftig dann die Emissionen beider Unternehmensteile zur Verfügung stehen. Findet die Emission jedoch zwischen der Basisperiode und dem Beginn des Emissionshandels statt, so ist sicherzustellen, dass dem fusionierten Unternehmen bei der Primärallokation die Anteile der beiden ursprünglichen Unternehmen zugeteilt werden.

Alles in allem zeigt die Debatte um Newcomer, sowie um Stilllegungen und Fusionen von Unternehmen, dass das Grandfathering zwar zunächst vergleichsweise einfach und attraktiv erscheint, aber dennoch mit erheblichen Problemen behaftet ist, die bisher bei weitem noch nicht zufriedenstellend geklärt sind.

4.6.2.3 Benchmarking

Ebenso wie beim Grandfathering werden auch beim Benchmarking die Emissionsrechte kostenlos, allerdings auf der Grundlage von so genannten Benchmarks, zugeteilt.⁴⁸ Benchmarks sind spezifische Werte bezogen auf eine typische Outputgröße eines Sektors. Da im internationalen Luftverkehr eine sehr homogene Outputgröße existiert, auf die sich der Benchmark beziehen kann, nämlich die Flugleistung, sollte diese Option in die nähere Betrachtung gezogen werden. Für die Bestimmung des Benchmarks wird zunächst ein Durchschnittswert aus dem Aggregat der Emissionen aller erfassten Akteure und dem Aggregat der Flugleistungen gebildet und anschließend mit dem relativen Minderungsziel gewichtet. Durch Multiplikation dieses Durchschnittswerts bzw. Benchmarks⁴⁹ mit der Flugleistung des jeweiligen Akteurs ergibt sich dann die Menge an Emissionsrechten, die dem jeweiligen Akteur zugeteilt wird.

Vorteilhaft beim Benchmarking ist, dass hierdurch einige Probleme des Grandfatherings vermieden bzw. verringert werden. Denn da Newcomer unabhängig von der Effizienz der selbst eingesetzten Fluggeräte mit Emissionsrechten ausgestattet werden, besteht für sie – im Unterschied zum Grandfathering – ein Anreiz effiziente Fluggeräte einzusetzen und überschüssige Emissionsrechte zu veräußern. Beim Grandfathering würde der Einsatz von effizientem Fluggerät dagegen dazu führen, dass der Newco-

⁴⁸ Gelegentlich wird das Benchmarking deshalb als eine Sonderform des Grandfatherings bezeichnet.

⁴⁹ Neben dem Durchschnitt einer Basisperiode kommen als Benchmark auch Emissionswerte nach dem Stand der Technik, nach den praktizierten Emissionsbestwerten oder nach den bestmöglichen Technologien (Durchschnitt, State of the Art, Best Practice, Best Available Technology) in Frage (CAEP 2001).

mer in der Folgeperiode mit vergleichsweise wenigen Emissionsrechten ausgestattet wird und somit gegenüber bereits bestehenden Unternehmen benachteiligt wird. Insofern wäre es beim Grandfathering für Newcomer durchaus plausibel, alte, weniger effiziente Fluggeräte einzusetzen, nicht jedoch beim Benchmarking.

Darüber hinaus wird gerade bei der Wahl eines späten Basisjahres oder einer späten Basisperiode Early Action weit gehend berücksichtigt. Denn die spezifischen Emissionen von Unternehmen, die frühzeitig Minderungsmaßnahmen durchgeführt haben, liegen unterhalb des Durchschnitts. Deshalb werden sie bei der Primärallokation überproportional mit Emissionsrechten ausgestattet. Sie brauchen somit entweder weniger Emissionsrechte dazu kaufen oder können im günstigsten Fall sogar Emissionsrechte verkaufen. Die Primärallokation kann deshalb auf aktuellen Daten aufbauen, so dass die Abwägung zwischen der Verlässlichkeit der Daten und dem Umfang der Berücksichtigung von Early Action entfällt.

Das Benchmarking lässt sich allerdings weder sektorübergreifend noch in Sektoren mit sehr inhomogenen Produkten, wie z.B. in der chemischen Industrie, anwenden, da in diesem Falle kein gemeinsamer Nenner für die Ermittlung des Benchmarks gefunden werden kann. Sofern die Zahl der Produkte eines Sektors relativ gering ist, kann dieses Problem dadurch behoben werden, dass Subsektoren mit homogenen Produkten identifiziert und abgegrenzt und für diese Subsektoren individuelle Benchmarks berechnet werden.

Für den internationalen Luftverkehr besteht dieses Problem allerdings nicht. Denn der Output des Sektors ist hinreichend homogen. Als Nenner für die Berechnung bietet sich die Flugleistung in tkm an. Er kann sowohl für Luftfracht als auch für den Personenverkehr angewendet werden und integriert damit sogar zwei Marktsegmente des internationalen Luftverkehrs mit allerdings sehr ähnlichen Outputs. Alles in allem ist also das Benchmarking ein durchaus interessanter Ansatz, der auch für den Emissionshandel im internationalen Luftverkehr in Erwägung gezogen werden kann.

4.6.2.4 Hybridverfahren

Da alle zuvor dargestellten Allokationsverfahren spezifische Vor- und Nachteile aufweisen, können evtl. durch eine sinnvolle Kombination die Vorteile der Verfahren ausgenutzt und die Nachteile teilweise abgeschwächt werden. Würden beispielsweise die Emissionsrechte zu 80% nach dem Grandfathering zugeteilt und zu 20% auktioniert (IPPR 2000), so würde einerseits die von den betroffenen Akteuren abgelehnte hohe Kostenbelastung einer Auktion deutlich reduziert und andererseits dennoch frühzeitig ein verlässliches Preissignal geschaffen. Auch die Nachteile des Grandfatherings (Umgang mit Newcomern etc.) würden bei dieser Kombination abgeschwächt, wenn auch nicht völlig beseitigt.

Auch für die Allokation der Emissionsrechte im Rahmen eines Emissionshandelssystems für den internationalen Luftverkehr bietet sich eine Kombination mehrerer Allokationsverfahren an. Denn einerseits würden die mit einer Auktion der Emissionsrechte verbundenen Kosten zu erheblichen Vermeidungsreaktionen bei den Verbrauchern

führen, andererseits aber liegen nicht für alle Komponenten der möglichen Bemessungsgrundlage hinreichend verlässliche historische Daten vor.

Wird lediglich CO₂ als Bemessungsgrundlage gewählt (Abschnitt 4.4.2.1), so stehen im Prinzip alle der zuvor dargestellten Allokationsverfahren zur Verfügung. Es liegen hinreichend verlässliche Daten für ein Grandfathering oder für die Ermittlung eines Benchmarks vor. Die Emissionsrechte könnten in diesem Fall allerdings auch vollständig oder nur anteilig auktioniert werden.

Wird jedoch die umfassendere Bemessungsgrundlage gewählt (Abschnitt 4.4.2.3), so wären vor allem zwei Verfahren denkbar:

- Für den Anteil der Kohlendioxid-, Wasserdampf- und Stickoxidemissionen liegen voraussichtlich hinreichend flugspezifische historische Daten für die Anwendung des Grandfatherings vor. Für Kondensstreifen gibt es jedoch lediglich global aggregierte Abschätzungen, so dass das Grandfathering hier nicht angewendet werden kann. Dieser Anteil an den gesamten Treibhausgasemissionen des internationalen Luftverkehrs sollte deshalb auktioniert werden. Dies scheint auch deshalb gerechtfertigt, weil die kondensstreifenbedingten Treibhausgasemissionen durch eine geringfügige Änderung der Flugrouten und mit nur sehr geringen Mehrkosten vermieden werden können. Durch die Auktionierung des Anteils der kondensstreifenbedingten Treibhausgasemissionen würde ein sehr hoher Anreiz gesetzt, gezielt diese Emissionen zu vermeiden. Und genau aus diesem Grund wird die Kostenbelastung durch die Auktion auch geringer ausfallen, als nach dem Anteil der kondensstreifenbedingten Emissionen an den gesamten Treibhausgasemissionen des internationalen Luftverkehrs zu vermuten wäre.
- Alternativ dazu könnte die Primärallokation nach dem Benchmarking auf der Grundlage eines durchschnittlichen Emissionsfaktors erfolgen. Der Vorteil wäre, dass die Emissionsrechte vollständig kostenlos ausgegeben werden können und deshalb keine Rückverteilung oder sonstige Entscheidung über die Verwendung des Aufkommen notwendig ist. Darüber hinaus kann für die Ermittlung des Benchmarks auf relativ aktuelle Daten zurückgegriffen werden. Denkbar wäre sogar, dass vor Beginn des Emissionshandels eine Messperiode eingeführt wird, in der die für die Bestimmung der Bemessungsgrundlage notwendigen Daten gemessen und be-

richtet werden.⁵⁰ Auf Basis dieser Daten könnte dann der Benchmark ermittelt werden, der später für die Primärallokation der Emissionsrechte angewendet wird.

Beide Verfahren können unabhängig davon eingesetzt werden, ob ein offener oder geschlossener Emissionshandel im internationalen Luftverkehr eingeführt wird.

4.7 Monitoring

Für die Funktionsfähigkeit eines Emissionshandelssystems sind klare Verantwortungsstrukturen und ein strenges Monitoring-System unerlässlich. Es müssen zuverlässige Daten vorliegen, die erlauben, die tatsächlichen Emissionen den zulässigen Emissionen gegenüberzustellen und die Einhaltung der Minderungsverpflichtungen zu überprüfen. Neben der Überwachung der Emissionen bzw. der relevanten Indikatoren (Monitoring) geht es dabei auch um die regelmäßige, lückenlose und vollständige Berichterstattung der erhobenen Daten (Reporting) sowie um die Verifikation der berichteten Daten (Verification). Darüber hinaus müssen Register für die Verwaltung der Emissionsrechte aufgebaut werden (Registries).

Sofern ein offenes Emissionshandelssystem für den Luftverkehr etabliert wird, muss sichergestellt werden, dass Bedingungen für Überwachung, Berichterstattung und Verifikation mit dem Kioto-Protokoll kompatibel sind (Tsai et al. 2000). Die Berichterstattung sollte darüber hinaus transparent sein. Denkbar wäre etwa, dass wesentliche aktuelle Daten für alle unmittelbar am Emissionshandel beteiligten Akteure jederzeit im Internet abgerufen werden können. IPPR (2000) schlägt vor, ein System zur Berichterstattung zu etablieren, das dem in den USA von der Environmental Protection Agency für den Handel mit SO₂-Zertifikaten eingeführten System gleicht. Handelspartner, Nationalstaaten und UNFCCC-Organen sollen dabei auf einer täglich aktualisierten Internetseite Zugriff auf gehandelte Emissionsmengen und Preise haben. Soweit als möglich sollten diese Daten auch einer breiteren Öffentlichkeit zugänglich gemacht werden, da hierdurch die Transparenz und damit das Vertrauen in dieses System steigt.

Die Emissionsrechte sollten in elektronischer Form ausgestellt, gehandelt und gehalten werden. Für die Verwaltung der Emissionsrechte müssen elektronische Register aufgebaut werden, in denen die einzelnen Transaktionen (Ausgabe, Übertragung, Nut-

⁵⁰ Grundsätzlich sollte die Basisperiode für das Grandfathering vor der Entscheidung über die Einführung eines Emissionshandelssystems liegen, da andernfalls die erfassten Akteure versuchen werden, durch strategisches Verhalten (z.B. verstärkten Einsatz besonders alter Flugzeuge) ihre individuelle Ausgangsposition zu verbessern. Beim Grandfathering macht derartiges strategisches Verhalten keinen Sinn, da es zwar den Benchmark nach oben verschiebt, nicht aber die Ausgangsposition eines einzelnen Unternehmens im Vergleich zu den Wettbewerbern. Denkbar wäre jedoch, dass alle erfassten Akteure im Sinne eines Kartells bestrebt sind, den Benchmark bewusst zu erhöhen, um die Ausstattung des gesamten Sektors mit Emissionsrechten zu vergrößern. Auch wenn durch solche Strategien der Benchmark etwas verfälscht wird, ist nicht zu erwarten, dass das Emissionshandelssystem insgesamt ad absurdum geführt wird, da die Anwendung dieser Strategien gleichzeitig durch andere Faktoren (Wettbewerb, Treibstoffkosten etc.) begrenzt wird.

zung bzw. Entwertung etc.) festgehalten und der aktuelle Status eines Emissionsrechts jederzeit zweifelsfrei festgestellt werden können. Zur Erleichterung des internationalen Handels mit Emissionsrechten und zur Erhöhung der Transparenz sollten die Daten der Rechte harmonisiert werden (international eindeutige Seriennummer, Ausgabejahr etc.).

Bei einem offenen Emissionshandelssystem ist es wichtig, dass eindeutige Schnittstellen mit dem Emissionshandelsregister unter dem Kioto-Protokoll festgelegt werden. Allerdings könnte im Falle des offenen Emissionshandels auch in Erwägung gezogen werden, die Emissionsrechte und ihren jeweiligen Status im selben Register bzw. mit derselben Registersoftware zu erfassen, in dem auch die Emissionsrechte unter dem Kioto-Protokoll erfasst werden.

Für den Fall, dass die Minderungs- oder Stabilisierungsverpflichtungen zunächst auf der Ebene der Nationalstaaten vereinbart werden und diese dann juristische Personen ermächtigen am Emissionshandel teilzunehmen, müssen parallel zum Register auf Ebene der Staaten nationale Register der teilnehmenden Staaten für juristischen Personen in ihrem Land entwickelt werden. Dabei könnten – wie im Rahmen des Kioto-Protokolls bereits angedacht – mehrere Staaten zusammen ein Register nutzen.

Durch internationale Richtlinien muss außerdem gewährleistet werden, dass die Fluggesellschaften die Berechnungen ihrer Treibhausgasemissionen nach einem einheitlichen Prinzip durchführen. Die Ausgestaltung der Emissionsberichterstattung auf der Ebene der Fluggesellschaften sollte unter Einbeziehung von Sachverständigen der ICAO erarbeitet werden. Die ICAO ist derzeit bereits in die Zulassung von Triebwerken involviert und entwickelt darüber hinaus Flugeffizienzfaktoren, die als Grundlage für eine aufkommensneutrale Abgabe dienen sollen (Abschnitt 2.2). Vor diesem Hintergrund liegt es nahe, der ICAO die Verantwortlichkeit für technische Fragestellungen im Rahmen der Implementation eines Emissionshandelssystems im internationalen Luftverkehr zu übertragen. Folgende Aufgaben würden dabei auf die ICAO zukommen: Bestimmung des Stands der Technik sowie der besten verfügbaren Technologie (Best available technology), Festlegung aktueller Emissionsfaktoren, detaillierte Berechnungsverfahren für die Bestimmung der Bemessungsgrundlage etc.

Unabhängig davon, ob ein offenes oder geschlossenes Emissionshandelssystem für den internationalen Luftverkehr etabliert wird, stellt sich die Frage, welche institutionellen Strukturen national wie auch auf internationaler Ebene für die Kontrolle des Emissionshandelssystems aufgebaut werden müssen. Durch diese Institution muss sichergestellt sein, dass nicht mehr Emissionen entstehen als Emissionsrechte im Umlauf sind. Auch bei einem geschlossenen System für den Emissionshandel im internationalen Luftverkehr könnten diese Aufgaben der Institution übertragen werden, die auch für den Emissionshandel im Rahmen des Kioto-Protokolls zuständig ist (IPPR 2000).

Die Einhaltung der eingegangenen Verpflichtungen sollte von den verpflichteten Akteuren nachgewiesen werden, also durch die Nationalstaaten und/oder die ermächtigten

juristischen Personen. Hierfür müssen die zur Überprüfung der Pflichterfüllung vorgelegten Berichte und Inventare von unabhängigen Dritten verifiziert werden, die zuvor von den Nationalstaaten für diese Aufgabe akkreditiert wurden. Nicht die Kontrollinstanzen müssen also den Verpflichteten Fehlverhalten nachweisen sondern die nachweisverpflichteten Akteure müssen zweifelsfrei nachweisen, dass sie ihre Pflichten ordnungsgemäß erfüllt haben. Da die ermächtigten Akteure in der Regel unmittelbaren Zugriff auf ihre Daten haben, kann durch diese Beweislaststruktur der Kontrollaufwand und der Umfang öffentlicher Kontrollinstanzen insgesamt vergleichsweise gering gehalten werden.

4.8 Sanktionen

Durch Sanktionen soll gewährleistet werden, dass die Regeln des Emissionshandelsystems und die eingegangenen bzw. auferlegten Verpflichtungen auch eingehalten werden. Sie sollten deshalb „wirksam, verhältnismäßig und abschreckend“ sein (COM (2001) 581) und für die Akteure einen Anreiz darstellen, die Verpflichtungen des Systems einzuhalten. Entspricht die Sanktion beispielsweise dem Dreifachen des durchschnittlichen Marktpreises eines Emissionsrechts in der betrachteten Verpflichtungsperiode, so werden die Akteure sich ernsthaft bemühen, den Sanktionsfall nicht eintreten zu lassen.

Grundsätzlich sollte eine Sanktion sowohl bei Nicht-Erfüllung der Minderungs- oder Stabilisierungsverpflichtungen als auch bei Nicht-Erfüllung der Berichts-, Monitoring und Kontrollpflichten erfolgen. Da der erste Fall für die Funktionsfähigkeit des Systems wesentlicher ist, sollte auch die Sanktion hierfür strenger sein. Der Sanktionskatalog sollte also die Bedeutung des Vergehens angemessen widerspiegeln.

Im Falle eines Emissionshandelssystems, bei dem zunächst die Nationalstaaten verbindliche Verpflichtungen eingehen und juristische Personen nur vermittelt über die Nationalstaaten am internationalen Emissionshandel teilnehmen, müssen die Sanktionen zunächst auf der Ebene der teilnehmenden Staaten festgelegt werden. Da die Nationalstaaten ihrerseits ein großes Eigeninteresse an der Einhaltung der Minderungs- oder Stabilisierungsverpflichtungen der ermächtigten juristischen Personen haben, könnte die Sanktionierung der Fluggesellschaften nach dem Subsidiaritätsprinzip theoretisch den Nationalstaaten überlassen bleiben. Dennoch wären harmonisierte Untergrenzen für Sanktionsmaßnahmen sinnvoll, damit Wettbewerbsverzerrungen auf jeden Fall unterbunden werden und die Administration des Handelssystems vereinfacht wird.

Bei einem offenen Emissionshandelssystem sollte auf eine moderate Sanktionierung⁵¹ unbedingt verzichtet werden, da sowohl die ermächtigten juristischen Personen als auch die Nationalstaaten jederzeit die Möglichkeit haben, auf einem sehr großen liquiden Markt Emissionsrechte für die Einhaltung ihrer Mengenziele zu erwerben.

Damit die Kompatibilität des Emissionshandels im internationalen Luftverkehr mit dem Kioto-Protokoll sichergestellt ist, sollte in Erwägung gezogen werden, die Sanktionsmaßnahmen in Anlehnung an die in den Marrakech Accords festgelegten Regeln auszugestalten. Dort ist vorgesehen, dass sowohl bei Nicht-Erfüllung der Minderungsziele als auch bei der Nicht-Erfüllung der Berichts-, Monitoring- und Kontrollpflichten die Nationalstaaten von der Nutzung der flexiblen Instrumente ausgeschlossen werden. Bei Nicht-Erfüllung der quantitativen Minderungs- oder Stabilisierungsverpflichtungen ist darüber hinaus eine „Nachzahlung“ des Fehlbetrags multipliziert mit dem Faktor 1,3 in der nächsten Verpflichtungsperiode vorgesehen.

Grundsätzlich könnten diese Sanktionen auch auf die zur unmittelbaren Teilnahme am Emissionshandelssystem ermächtigten juristischen Personen übertragen werden. Sie könnten vom Emissionshandel bzw. genauer vom Verkauf von Emissionsrechten solange ausgeschlossen werden, bis sie nachweisen können, dass sie ihre Mengenziele einhalten werden. Während des Ausschlusses vom Emissionsrechtehandel dürften die zur Teilnahme am Emissionshandel ermächtigten juristischen Personen nicht mehr emittieren, als ihnen bei der Primärallokation zugestanden wurde abzüglich der Emissionen, die sie im Vorjahr über ihre Emissionsrechte hinaus verursacht haben.

Diese Nachkaufpflicht kann darüber hinaus mit einer Geldstrafe kombiniert werden. Für jedes emittierte CO₂-Äquivalent, das nicht durch Emissionsrechte abgedeckt ist, müsste dann ein Bußgeld bezahlt werden. Die Höhe des Bußgeldes könnte in Anlehnung an das amerikanische SO₂-Allowance Trading Programme, bei dem die Sanktion dem dreifachen des im Vorfeld prognostizierten Marktpreises entspricht, festgelegt werden. Alternativ kann auch die dreifache Höhe des tatsächlich erzielten durchschnittlichen Preises für Emissionsrechte gewählt werden. Bei wiederholtem Regelverstoß könnten die Nationalstaaten ein Start- und Landeverbot auf ihrem Territorium für die Akteure verhängen, die ihrer Verpflichtung wiederholt nicht nachgekommen sind.

⁵¹ Von einer moderaten Sanktionierung wird gesprochen, wenn die Sanktion für die Nicht-Einhaltung der Minderungs- oder Stabilisierungsverpflichtung nur unwesentlich über dem erwarteten Marktpreis liegt. Steigt der Marktpreis für Emissionsrechte beispielsweise über das Niveau der Sanktion, weil das Mengenziel zu ambitioniert gesetzt wurde und von den Akteuren insgesamt nicht eingehalten werden kann, so ist es für den einzelnen Akteur vorteilhafter seine Verpflichtungen nicht zu erfüllen und stattdessen die Sanktion in Kauf zu nehmen. Das Mengenziel wird in diesem Falle allerdings verfehlt. Juristisch betrachtet handelt es sich in diesem Falle aber eigentlich nicht um eine Sanktion sondern um die Nutzung einer so genannten Buy-out-Option. Denn während die Sanktion im Falle nicht-intendierten Verhaltens fällig wird, ist die Nutzung der Buy-out-Option intendiert und soll helfen überschießende Preise von Emissionsrechten zu vermeiden. Sie sollte deshalb eher im Rahmen der Debatte über Mechanismen zur Flexibilisierung des Marktes (Banking, Borrowing etc.) diskutiert werden als im Rahmen der Sanktionen.

4.9 Cap

Vor Einführung eines Emissionshandelssystems muss das Emissionsmengenziel, im Englischen Cap genannt, festgelegt werden. Ausgangspunkt für die Festlegung des Caps sind naturwissenschaftliche und ökologische Erkenntnisse über die Belastbarkeit der Umwelt mit bestimmten Emissionen. Das gilt soweit das Emissionshandelssystem alle Verursacher erfasst. Wenn jedoch das Handelssystem nur eine Teilmenge der Verursacher erfasst, muss zudem festgestellt werden, für welchen Anteil der Emissionen die Gruppe der erfassten Verursacher verantwortlich ist. Außerdem muss abgewogen werden, welche technischen und organisatorischen Vermeidungsoptionen den einzelnen Verursachergruppen zur Verfügung stehen, ob die Teilgruppen der Verursacher gleichermaßen zur Vermeidung verpflichtet werden können oder ob die Reduktions- oder Stabilisierungspflichten z.B. analog zu den Vermeidungsoptionen unterschiedlich aufgeteilt werden müssen. Neben ökologischen Kriterien fließen also auch technische, wirtschaftliche und politische Überlegungen in die Bestimmung eines Caps ein. Letztlich ist die Festlegung eines Emissionsmengenziels immer auch eine normative Frage, die nicht ausschließlich nach streng wissenschaftlichen Kriterien entschieden werden kann sondern auch Aspekte der politischen Durchsetzbarkeit und Akzeptanz beinhaltet.

Für einen Emissionshandel im internationalen Luftverkehr können deshalb unterschiedliche Caps in Betracht gezogen werden. Denkbar wäre eine Übertragung des im Kioto-Protokoll vereinbarten Caps auf den internationalen Luftverkehr. Demnach müssten die Emissionen im Zeitraum 2008 bis 2012 um 5,2% gegenüber dem Niveau von 1990 gesenkt werden.⁵² Da der internationale Flugverkehr sehr stark wächst und zudem vergleichsweise hohe Treibhausgasvermeidungskosten hat, kann dieses Ziel wohl nur bei einem so genannten offenen Emissionshandel, bei dem der Luftfahrtsektor Emissionsrechte aus anderen Sektoren zukauf, auferlegt werden. Im Falle eines geschlossenen Emissionshandels, müssten die Emissionsminderungen vollständig im Luftverkehr erbracht werden, was unweigerlich zu einer drastischen Einschränkung des internationalen Flugverkehrs gegenüber heute führen würde.

Eine Stabilisierung der Emissionen gegenüber dem Niveau von 1990 würde in etwa dem aktuellen Stand der Kioto-Verpflichtungen entsprechen, da eine absolute Emissionsminderung in den Annex I-Staaten aufgrund des Rückzugs der USA aus dem Kioto-Protokoll faktisch wohl kaum mehr zu erreichen sein wird. Aber auch eine Stabilisierung der Emissionen auf dem Niveau von 1990 würde eine deutliche Einschränkung des internationalen Flugverkehrs bedeuten, da der internationale Flugverkehr seit 1990 beträchtlich gewachsen ist. Auch dieses Ziel wäre also vermutlich nur bei einem offenen Emissionshandelssystem erreichbar.

⁵² Sollte der Emissionshandel im internationalen Luftverkehr nicht bereits in der ersten sondern erst in der zweiten Verpflichtungsperiode des Kioto-Protokolls eingeführt werden, so wäre das für die zweite Periode vereinbarte Ziel auf den internationalen Flugverkehr zu übertragen.

Auch eine Stabilisierung gegenüber dem aktuellen Niveau der Emissionen oder gegenüber dem Niveau des Jahres 2000 kann in Erwägung gezogen werden. Aber auch hier gilt angesichts der enormen Wachstumsprognosen für den internationalen Flugverkehr, dass dies bei einem geschlossenen System eine erhebliche Wachstumseinschränkung bedeuten würde, so dass auch dieses Cap wohl nur bei einem offenen Emissionshandelssystem ernsthaft in die Überlegungen einbezogen werden kann.

Im Rahmen der Überlegungen von ICAO/CAEP (2000) zum Design eines Emissionshandelssystems für den internationalen Flugverkehr wurde vorgeschlagen, das Wachstum der Emissionen gegenüber dem Trend zu halbieren⁵³ oder es um 5% gegenüber dem Trend zu senken. Diese Mengenziele fallen deutlich niedriger aus als die zuvor genannten, da sie in jedem Falle ein weiteres Wachstum der Emissionen des internationalen Flugverkehrs zulassen. Im Falle eines geschlossenen Emissionshandelssystems für den internationalen Luftverkehr würde diese "Minderungsverpflichtung"⁵⁴ teilweise durch Effizienzsteigerungen und teilweise durch Vermeidung von Flügen erbracht werden. Für diese schwächeren Ziele ist also denkbar, dass sie sowohl für ein geschlossenes als auch für ein offenes Emissionshandelssystem vereinbart werden können. Tabelle 13 zeigt noch mal die zuvor dargestellten Caps in einer Übersicht.

Tabelle 13: Mögliche Caps für den Emissionshandel im internationalen Luftverkehr

Cap	Systemgrenzen
-5,2 % gegenüber 1990	Offen
0 % gegenüber 1990	Offen
0 % gegenüber 2000	Offen
Halbierung des Wachstums gegenüber Trend	Geschlossen/offen
-5 % gegenüber Trend	Geschlossen/offen

Quelle: ICAO/CAEP 2000 (bezogen auf CO₂), eigene Vorschläge des Öko-Instituts

Bei den in Tabelle 13 dargestellten Zielen nehmen die absoluten Emissionsminderungen von oben nach unten ab. Die oberen Caps sind also deutlich strenger als die unteren. A priori kann an dieser Stelle jedoch keines der Caps als besser oder angemessener für den Emissionshandel im internationalen Luftverkehr klassifiziert werden. Für eine solche Bewertung müssten weitere Aspekte der Ausgestaltung des Systems sowie zumindest grobe Abschätzungen der ökonomischen Auswirkungen der unterschiedlichen Caps auf den internationalen Luftverkehr berücksichtigt werden. Doch

⁵³ Die Halbierung des Wachstums gegenüber dem Trend ist ungefähr gleichbedeutend mit einem jährlichen Zuwachs von ca. 1,5 % zwischen 1990 und 2010. Dieses Wachstum entspricht einen Cap von ungefähr 135 % gegenüber dem Emissionsniveau von 1990 (ICAO/CAEP 2000).

⁵⁴ Absolut findet in diesem Falle keine Minderung sondern lediglich eine Begrenzung des Emissionswachstums statt.

auch unter Berücksichtigung dieser Aspekte bleibt die Festlegung eines Emissionsziels letztlich immer eine normative Frage, die politisch verantwortet werden muss.

4.10 Übersicht

Theoretisch könnten die verschiedenen zuvor dargestellten Ausgestaltungsoptionen in vielfältiger Weise miteinander kombiniert werden. Praktisch jedoch schließt die Festlegung auf einige der Optionen die Auswahl anderer Optionen aus, weil die Optionen zum Teil voneinander abhängig sind. In Tabelle 14 (Seite 105) wurden deshalb die verschiedenen Ausgestaltungsoptionen zu in sich konsistenten Ansätzen für ein Emissionshandelsmodell im internationalen Luftverkehr zusammengestellt, die gemäß den bisherigen Überlegungen am ehesten in Frage kommen. Diese Zusammenstellung ist jedoch keineswegs abschließend. Neben den hier dargestellten Varianten können durchaus weitere, in sich konsistente Varianten entwickelt werden.

Bei einem offenen Emissionshandelsmodell (Optionen 1 & 2) sollte auf jeden Fall die umfassende Bemessungsgrundlage gewählt werden, da ansonsten die Gefahr besteht, dass die Treibhausgasemissionen des Luftverkehrs unterschätzt werden. In Abhängigkeit von der Bemessungsgrundlage liegt es dann wiederum nahe, die Fluggesellschaften als nachweispflichtige Akteure auszuwählen und die Emissionen nach dem Abflug bzw. Zielort zuzuweisen. Gestaltungsspielraum bei dieser Variante besteht dann vor allem hinsichtlich des Primärallokationsverfahrens (Benchmarking oder kombiniertes Verfahren) sowie hinsichtlich des Caps.

Optionen 3 & 4 gehen von einem geschlossenen Emissionshandel im internationalen Luftverkehr aus. Da hier kein Austausch mit dem Kioto-Protokoll stattfindet, besteht größere Wahlfreiheit bezüglich der Bemessungsgrundlage und auch hinsichtlich der teilnehmenden Staaten. Bei den Optionen 3 & 4 wurde lediglich CO₂ als Bemessungsgrundlage gewählt. Gestaltungsspielraum ergibt sich hinsichtlich der nachweispflichtigen Akteure.

Werden die Treibstoffimporteure zum Nachweis der Emissionsrechte verpflichtet, sollten die Emissionsrechte auktioniert werden (Abschnitt 4.5.3.1). Sollen jedoch die Fluggesellschaften den Nachweis erbringen, so könnte die Primärallokation auch nach dem Grandfathering erfolgen.

Tabelle 14: Übersicht über die Ausgestaltungsoptionen

Mögliche Optionen	1	2	3	4
Handelsregime				
• offen	x	x		
• geschlossen			x	x
• halboffen				
Bemessungsgrundlage				
• CO ₂			x	x
• CO ₂ , H ₂ O				
• CO ₂ , H ₂ O, NO _x , Kondensstreifen	x	x		
• CO ₂ , H ₂ O, NO _x , Kondensstreifen, Partikel				
Nachweispflichtige Akteure				
• Treibstoffimporteure und -produzenten			x	
• Triebwerk- u. Flugzeughersteller				
• Fluggesellschaften	x	x		x
• Flughafen				
Allokation der Emissionen				
• Ort des Reiseantritts/-ziel von Passagiers/Fracht, alternativ Aufteilung zwischen Start/Ziel				
• Abflugsort/Ziel des Flugzeugs, alternativ Aufteilung zwischen Abflugsort/Ziel	x	x		
• Nationalität der Transportunternehmens				
• Verkaufsland der Treibstoffe (Bunker Fuels)			x	x
Verpflichtete Nationalstaaten				
• Annex I Staaten	x	x		
• Andere Staatenkombination			x	x
Primärallokation				
• Auktionierung			x	
• Grandfathering nach historischen Emissionen		x		x
• Grandfathering/ Benchmarking				
• Kombination Grandfathering/Benchmarking und Auktionierung	x			
Cap				
• -5,2% bi 2010 gegenüber 1990				
• Stabilisierung bis 2010 gegenüber 1990				
• Stabilisierung bis 2010 gegenüber 2000				
• -50% bezogen auf Trend bis 2010				
• -5% bezogen auf Trend bis 2010				

Quelle: Eigene Darstellung

5. Perspektiven des Luftverkehrs

Für die Akzeptanz und die Umsetzungschancen eines Emissionshandels im Luftverkehr ist von entscheidender Bedeutung, welche wirtschaftlichen Auswirkungen das System hervorruft und in welchem Verhältnis diese zum Umfang der Emissionsminderung stehen. Eine grobe quantitative Abschätzung der wirtschaftlichen und ökologischen Effekte eines Emissionshandelssystems kann mit Hilfe von Modellrechnungen auf der Grundlage von Szenarien vorgenommen werden.

Abbildung 11: Wesentliche Variablen des AERO-Modellsystems

Makroökonomische und demographische Entwicklung

- Makroökonomisches Wachstum
- Eigenständiges Flugverkehrswachstum
- Bevölkerungsentwicklung

Technologische Entwicklung

- Entwicklung der Flugzeugtechnologie (Treibstoff, Emissionen)
- durchschnittliches Alter der Flugzeugflotte/ Alter der Flugzeuge bei Verschrottung
- Bedarf an Instandhaltung von Flugzeugen
- Einführung großer Flugzeuge
- Emissionsfaktoren von Bodentransportmitteln

Marktentwicklung

- Betriebskosten
- Einführung von Hochgeschwindigkeitszügen
- Leistungsabhängige Kosten
- Flottenwachstum

Quelle: MTPWW 2002

Szenarien bilden an Hand von ausgewählten Kenngrößen einen Zustand in der Zukunft ab, sind also immer hypothetisch. In der Regel variieren Szenarien in Abhängigkeit von den getroffenen Annahmen in größeren Bandbreiten, sollen aber damit auch die Bandbreite der möglichen Entwicklungen aufzeigen. Um die Effekte eines Emissionshandelssystems im Luftverkehr zu quantifizieren, muss zunächst ein so genanntes Referenz- oder Basisszenario entwickelt werden, das die Entwicklung ohne die Implementierung des Emissionshandelssystems beschreibt. Diesem Basisszenario werden in der Regel mehrere Politik- oder Maßnahmen szenarien gegenübergestellt, in denen verschiedene Ausgestaltungsoptionen des Emissionshandels abgebildet werden. Die jeweiligen variablen Kenngrößen sollten dabei so gewählt werden, dass durch sie die

einzel- und gesamtwirtschaftlichen Auswirkungen eines Emissionshandelssystems einerseits sowie der ökologische Nutzen andererseits abgebildet und verglichen werden können.

In der Vergangenheit wurden verschiedene Vorhersagen und Szenarien bezüglich der Treibhauswirkungen des Luftverkehrs mit sehr unterschiedlichen Zeithorizonten entwickelt. Differenzierte Abschätzungen bzw. Modellrechnungen der wirtschaftlichen und ökologischen Effekte eines Emissionshandelssystems im Luftverkehr sind jedoch sowohl auf nationaler als auch auf internationaler Ebene kaum vorhanden. Das AERO-Modellsystem ist eines der ersten umfassenden Modelle, welches eine quantitative Abschätzung abzubilden vermag. Unter anderem wurden die Auswirkungen eines offenen Emissionshandels in Abhängigkeit von einzelnen Ausgestaltungsoptionen des Systems abgebildet.

Die Aussagekraft von Szenarien hängt einerseits von der Qualität der Datengrundlage und andererseits von den zugrundgelegten Annahmen ab. Die Spezifizierung der Annahmen ist dabei mit vielen Unsicherheiten verknüpft. Zur Einordnung der nachfolgend dargestellten Szenarioanalyse werden deshalb zunächst die zentralen Einflussfaktoren auf die Emissionen des Flugverkehrs erläutert:

- Die *Entwicklung der Nachfrage* wird in hohem Maße durch makroökonomische und demographische Faktoren beeinflusst. Obwohl in der Vergangenheit der Luftverkehr wesentlich stärker als die Weltwirtschaft gewachsen ist, verweisen ökonomische Theorien und empirische Studien auf eine enge Korrelation beider Wachstumsraten (IPCC 1999). Daher basiert die Mehrzahl der Vorhersagen der Nachfrage im Flugverkehr auf der Annahme, dass die Nachfrage in erster Linie durch ökonomische Entwicklungen beeinflusst wird. Ökonometrische Analysen zeigen, dass etwa zwei Drittel des Nachfragezuwachses auf das Wachstum des Brutto sozialproduktes zurückzuführen ist (IPCC 1999). Das darüber hinaus gehende Wachstum des Flugverkehrs erklären Vedantham/Oppenheimer (1998) durch Bevölkerungsentwicklung und die Veränderung der Einkommensverteilung. Meskill (2002) und Nielsen (2001) sehen den zunehmenden Handel und die Globalisierung sowie eine Veränderung des Reiseverhaltens und des Zeit- und Geldbudgets als weitere Einflussfaktoren auf die Nachfrage.
- Die *technologische Entwicklung* – insbesondere im Hinblick auf Treibstoffeffizienz und Emissionsminderung – wird bisher vor allem durch die Entwicklung der Wirtschaftlichkeit von Innovationen beeinflusst. Die Treibstoffeffizienz beispielsweise nahm in der Vergangenheit kontinuierlich zu. Der spezifische Treibstoffverbrauch ist seit Einführung der ersten Jets um 70% zurückgegangen, wobei 40% durch Verbesserung der Triebwerke und 30% aufgrund verbesserten Flugzeugdesigns erreicht wurden (IPCC 1999). Die Verbesserung der Triebwerke ist vor allem auf die Entwicklung und den Einsatz moderner High-bypass Triebwerkstechnologie sowie auf Verbrennungen bei erhöhtem Druck und höheren Temperaturen zur Verbesserung der Treibstoffeffizienz zurückzuführen. Diese Entwicklung hat zu einer drastischen Verringerung der CO₂-Emissionen und der Emissionen an unverbrann-

ten Kohlenwasserstoffen geführt, während die NO_x -Emissionen zumindest in der letzten Dekade tendenziell zunehmen.

- Auch die *Rahmenbedingungen des Flugverkehrsmarktes* haben entscheidenden Einfluss auf Entwicklungen in den Szenarien. Hierzu zählen Annahmen bezüglich der Bereitstellung notwendiger Infrastruktur bzw. evtl. Kapazitätsengpässe (Flughäfen, Flugsicherung etc.), Annahmen bezüglich der Treibstoffversorgung sowie Annahmen bezüglich Marktform und Wettbewerb (Liberalisierung des Luftverkehrsmarktes etc.). Diese Faktoren werden stark durch politische Entscheidungen beeinflusst und lassen sich deshalb meist nur schwer vorhersagen. Aus diesem Grund werden diese Annahmen oft in verschiedenen Szenarioläufen variiert, wodurch die Auswirkungen auf die Gesamtentwicklung abgebildet werden können.

In Abbildung 11 (Seite 106) sind einige der wesentlichen Variablen dargestellt, die im Rahmen der AERO-Modellierung berücksichtigt worden sind.

In den folgenden Abschnitten werden zunächst verschiedene Szenarioanalysen beschrieben und miteinander verglichen. Im Anschluss daran werden die umfassenden und relativ aktuellen Simulationsrechnungen mit dem AERO-Modellsystem, bei denen unter anderem auch die Einführung eines Emissionshandelssystems im Luftverkehr betrachtet wird, ausführlicher beschrieben.

5.1 NASA, ANCAT und DLR

Im Bericht „Aviation and the Global Atmosphere“ des IPCC (1999) werden die Emissionsszenarien von NASA, ANCAT (ECAC Working Group on Abatement of Nuisances Caused by Air Transport) und DLR (Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt) dargestellt. Die Daten dieser Szenarien stammen aus dreidimensionalen Klimamodellen (Breite, Länge, Höhe) und basieren darüber hinaus auf Annahmen zur Entwicklung des internationalen Flugverkehrs wie z.B. Flottenzusammensetzung, Start- und Landflughäfen, Flugfrequenzen, Flugrouten und -profile (IPCC 1999).

Die Modellierungen von NASA, ANCAT und DLR sind zwar im Grundsatz ähnlich, variieren allerdings hinsichtlich der Simulationsmethode. Außerdem greifen sie auf unterschiedlich detaillierte Datenbasen zurück. Insbesondere bei den Daten zum militärischen Luftverkehr weichen die Datenbasen deutlich voneinander ab. Zur Abschätzung des Treibstoffverbrauchs wurde bei allen Ansätzen eine Simulation aller Flüge in typischer Flughöhe und entlang der üblichen Flugkorridore durchgeführt. Berücksichtigt wurden darüber hinaus Triebwerk-Flugzeug-Kombinationen und die in Abhängigkeit von der Flughöhe variierenden Emissionsfaktoren. Wie Tabelle 15 (Seite 109) zeigt, liegen bei den betrachteten Szenarien Treibstoffverbrauch und CO_2 -Emissionen des zivilen Luftverkehrs im Basisjahr 1992 recht nah beieinander. Die NO_x -Emissionen fallen bei ANCAT und DLR jedoch gut 10% höher aus als bei der NASA.

Tabelle 15: Simulationsergebnisse von NASA, ANCAT und DLR

			1992			2015		
			NASA	ANCAT	DLR	NASA	ANCAT	DLR
Treibstoffverbrauch								
Ziviler Flugverkehr	Mio. t		114	114	112	288	272	271
Gesamter globaler Flugverkehr	Mio. t		139	131	129	309	288	285
CO₂-Emissionen								
Ziviler Flugverkehr	Mio. t		359	360	354	908	859	853
Gesamter globaler Flugverkehr	Mio. t		440	414	408	973	905	899
NO_x-Emissionen								
Ziviler Flugverkehr	Mio. t		1,4	1,6	1,6	4,0	3,4	3,4
Gesamter globaler Flugverkehr	Mio. t		1,7	1,8	1,8	4,1	3,5	3,6
NO_x-Emissionsfaktor								
Ziviler Flugverkehr	g/kg Treibstoff		12,6	14,0	14,2	13,7	12,4	12,6
Gesamter globaler Flugverkehr	g/kg Treibstoff		12,0	13,8	13,9	13,4	12,3	12,5

Quelle: IPCC 1999

Aufgrund unterschiedlicher Annahmen hinsichtlich der Nachfrageentwicklung und der eingesetzten Technologie fallen die Ergebnisse für das Jahr 2015 deutlich auseinander: ANCAT und DLR prognostizieren ein Wachstum des Treibstoffverbrauchs und der CO₂-Emissionen zwischen 1992 und 2015 von ca. 140%. Im Szenario der NASA steigen diese Werte sogar um 150% an. Bei den NO_x-Emissionen fällt dieser Unterschied noch deutlicher aus. Während ANCAT und DLR hier ein Wachstum von gut 110% vorhersagen, erwartet die NASA ein Wachstum um 170%. Gemäß der Projektionen von ANCAT und DLR wachsen der Treibstoffverbrauch und die CO₂-Emissionen des zivilen Flugverkehrs durchschnittlich um 3,9% pro Jahr. Die NASA erwartet sogar einen jährlichen Anstieg um 4,1%. Bei den NO_x-Emissionen unterscheiden sich die Wachstumsraten noch deutlicher. ANCAT und DLR ermitteln einen durchschnittlichen jährlichen Anstieg um 3,3%, während die NASA von 4,5% pro Jahr ausgeht. Unabhängig von den Unterschieden im Detail liegt das jährliche Wachstum aber bei allen Szenarien deutlich über 3%, so dass der Luftverkehr und die Emissionen des Luftverkehrs deutlich stärker wachsen als das durchschnittliche globale Wirtschaftswachstum.

5.2 ICAO

Die Forecasting and Economic Support Group (FESG) des CAEP hat langfristige Emissionsszenarien für den Luftverkehr entwickelt. Die Annahmen für die ökonomische Entwicklung basiert auf den so genannten IS92-Szenarien des IPCC (IS92a – base, IS92c – low, IS92e – high). Darüber hinaus wurden den Szenarien unter anderem folgende Annahmen zu Grunde gelegt:

- Der globale Luftverkehrsmarkt ist die Summe regionaler Teilmärkte mit verschiedenen Reifestufen.
- Geschäfts- und Privatreisen können in einem Modell zusammengefasst werden.

- Das Wachstum im Verkehrssektor wird primär vom globalen Wirtschaftswachstum angetrieben. Mit zunehmender Marktreife gleicht sich das Wachstum im Flugverkehr allmählich an die Entwicklung des BIP an.
- Treibstoff ist jederzeit verfügbar, wobei die Treibstoffpreise nicht unverhältnismäßig zu anderen Kosten steigen.
- Technische und regulatorische Veränderungen haben keine signifikanten Auswirkungen auf Flugpreise, Nachfrage und Service.
- Infrastruktur ist entsprechend der Nachfrage verfügbar.
- Entwicklungen in anderen Sektoren (Hochgeschwindigkeitszüge, Telekommunikation etc.) haben keine signifikante Auswirkung auf die Nachfrage im Luftverkehr.

Im Hinblick auf den technologischen Fortschritt werden zwei alternative Entwicklungsoptionen skizziert:

- Technologie-Option 1: Treibstoffeffizienz und NO_x-Reduktion werden bei der Entwicklung neuer Flugzeuge wie in der Vergangenheit weiterentwickelt. Die durchschnittliche Treibstoffeffizienz neu produzierter Flugzeuge wird deshalb bis zum Jahr 2050 um ca. 40 - 50% gegenüber 1997 verbessert. Der durchschnittliche NO_x-Emissionsfaktor steigt dabei allerdings auf 15,3 - 15,5 g/kg Treibstoff an.
- Technologie-Option 2: Die Reduktion der NO_x-Emissionen wird verstärkt vorangetrieben, so dass es zu einer geringeren Verbesserungen der Treibstoffeffizienz kommt. Die durchschnittliche Treibstoffeffizienz neu produzierter Flugzeuge würde bis zum Jahr 2050 folglich lediglich um ca. 30 - 40% gegenüber 1997 verbessert. Der flottendurchschnittliche NO_x-Emissionsfaktor könnte immerhin auf etwa 11,5 g/kg Treibstoff reduziert werden.

Tabelle 16: Ergebnisse der FESG Szenarien für 2050

	Einheit	NASA 1992	NASA 2015	Fa1 2050	Fa2 2050	Fc1 2050	Fc2 2050	Fe1 2050	Fe2 2050
Treibstoffverbrauch									
Ziviler Flugverkehr	Mio. t	114	288	457	473	254	263	730	758
Gesamter globaler Flugverkehr	Mio. t	139	309	471	488	268	277	744	772
CO₂-Emissionen									
Ziviler Flugverkehr	Mio. t	359	908	1.440	1.492	800	829	2.302	2.389
Gesamter globaler Flugverkehr	Mio. t	440	973	1.485	1.538	846	874	2.347	2.435
NO_x-Emissionen									
Ziviler Flugverkehr	Mio. t	1,4	4,0	7,0	5,4	3,9	3,0	11,3	8,7
Gesamter globaler Flugverkehr	Mio. t	1,7	4,1	7,2	5,5	4,0	3,1	11,4	8,8
NO_x-Emissionsfaktor									
Ziviler Flugverkehr	g/kg	12,6	13,7	15,3	11,4	15,4	11,4	15,5	11,5
Gesamter globaler Flugverkehr	g/kg	12,0	13,3	15,3	11,3	14,9	11,2	15,3	11,4

Quelle: IPCC 1999

Aus den drei verschiedenen Szenarien für die Nachfrage im Luftverkehr und den beiden technologischen Optionen ergeben sich insgesamt 6 FESG-Szenarien (Tabelle 16, Seite 110): Fa1 und Fa2 für den so genannten Basisfall, Fc1 und Fc2 im Falle eines relativ geringen Wachstums des globalen Bruttoinlandsprodukts (BIP) und Fe1 und Fe2 im Falle eines relativ starken BIP-Wachstums.

Im Basisfall wachsen der Treibstoffverbrauch und die CO₂-Emissionen des zivilen Luftverkehrs bis zum Jahr 2050 um gut 300%. Dies entspricht einem durchschnittlichen jährlichen Wachstum von 2,4 - 2,5%. Im Falle eines geringen weltwirtschaftlichen Wachstums würden sich Treibstoffverbrauch und CO₂-Emissionen lediglich verdoppeln (1,4 - 1,5%/a) während im Falle einer dynamischen Entwicklung der Weltwirtschaft ein Wachstum von rund 650% zu erwarten wäre (3,3%/a). Da die Reduzierung des NO_x-Emissionsfaktors in den Szenarien der zweiten Technologieoption geringer als das Nachfragewachstum ausfällt, steigen in allen Szenarien die absoluten NO_x-Emissionen. Allerdings liegen die NO_x-Emissionen in den Szenarien der zweiten Technologieoption um etwa 23% niedriger als in den Szenarien der ersten Technologieoption. Dafür müssen allerdings in diesen Szenarien rund 3% höhere CO₂-Emissionen in Kauf genommen werden.

5.3 EDF

Während in den bisher vorgestellten Szenarien lediglich ein maximaler Zeithorizont bis zum Jahr 2050 betrachtet wurde, entwickelt der Environmental Defence Fund (EDF) ein Langfristszenario bis zum Jahr 2100 (Vedantham/Oppenheimer 1998). Die Abschätzung der langfristigen Entwicklung von Luftverkehrsemissionen ist zwar mit großen Unsicherheiten behaftet, da die Wahrscheinlichkeit unvorhergesehener Änderungen der zentralen Einflussfaktoren mit zunehmendem Zeithorizont deutlich ansteigt. Dennoch sprechen verschiedene Gründe für derart langfristige Betrachtungshorizonte. Denn einerseits ist auch die Einführung eines Emissionshandelssystems eher mittel- bis langfristig zu erwarten. Andererseits dauert die Entwicklung neuer Flugzeuge allein schon etwa ein Jahrzehnt. Bei einer durchschnittlichen Lebensdauer von 25 bis 30 Jahren (Anker 2000) bestimmen also technologische Entscheidungen über Triebwerks- und Flugzeugdesign von heute die treibhauswirksamen Emissionen des Luftverkehrs bis zum Jahr 2040. Langfristszenarien sind deshalb eine unabdingbare Grundlage für technische, ökonomische und politische Diskussionen über die zukünftige Entwicklung des Luftverkehrs.

Grundlage der Flugverkehrsszenarien des EDF sind wiederum die IS92-Szenarien des IPCC. Dabei werden insbesondere die Annahmen der IS92-Szenarien zur Bevölkerungsentwicklung und zum Wachstum des BSP berücksichtigt (Tabelle 17, Seite 112).

In dem Modell, das den Szenarioanalysen zu Grunde liegt, wird einerseits zwischen Geschäfts- und Freizeitreisen und andererseits zwischen fünf verschiedenen Weltregionen differenziert. Darüber hinaus wurden zwei unterschiedliche Varianten für die Entwicklung der Nachfrage im Luftverkehr für die einzelnen Regionen definiert. Die Varianten

ten unterscheiden sich hinsichtlich der Annahmen über soziale Faktoren, Reisetrends, Durchdringungsraten moderner Kommunikationstechnologien, Entwicklung konkurrierender Transportmittel etc. für die verschiedenen Weltregionen. Aus diesen Annahmen kann dann eine Entwicklung der Nachfrage im Luftverkehrsmarkt abgeleitet werden, die durch den Beginn der Marktexpansions- und den Beginn der Sättigungsphase charakterisiert werden kann (Tabelle 18).

Tabelle 17: Bevölkerungs- und Wirtschaftsentwicklung in den IS92-Szenarien des IPCC

	Weltbevölkerung (Mrd.)		Wachstumsrate des BSP (%/a)	
	2025	2100	1990-2025	1990-2100
IS92a, IS92b	8,4	11,3	2,9	2,3
IS92c	7,6	6,4	2,0	1,2
IS92d	7,6	6,4	2,7	2,0
IS92e	8,4	11,3	2,5	3,0
IS92f	9,4	17,6	2,9	2,3

Quelle: Leggett et al. 1992

Tabelle 18: Annahmen zur Entwicklung der Nachfrage

	Nachfrage - pkm/Kopf -	Beginn der Expansion	Sättigung	
			Base-demand	High-demand
Industrielländer	178	Begonnen	2010	2010
Kürzlich entwickelte Industrieländer	52	Begonnen	2050	2030
Schnell entwickelnde Länder	4	2000	2070	2050
Langsam entwickelnde Länder	20	2010	2080	2060
Postkommunistische Länder	66	2010	2060	2040

Quelle: Vedantham/Oppenheimer 1998

Die wesentlichen Ergebnisse dieser Szenarien sind in Tabelle 19 (Seite 113) dargestellt. Da bei der Vielfalt der Szenarien die Übersicht schnell verloren geht, wurden hier von den insgesamt 10 Szenarien (5 unterschiedliche IS92- und 2 Nachfragevarianten) jedoch nur der Basisfall (IS92) in beiden Nachfragevarianten sowie das Szenario mit dem geringsten Nachfragewachstum (IS92c, Base-demand) und das Szenario mit dem größten Nachfragewachstum (IS92e, High-demand) dokumentiert.

Die Nachfrage wächst in den Basisszenarien je nach Nachfragevarianten zwischen 1990 und 2015 um 180 bis 360%. Dies entspricht einem Nachfragewachstum von 4,3 bzw. 6,2% pro Jahr. Die Bandbreite der jährlichen Wachstumsraten reicht dabei von 3,7% (IS92b, Base-demand) bis 6,6% (IS92e, High-demand). Das Wachstum der CO₂-Emissionen fällt aufgrund technischer und operativer Verbesserungen etwas geringer aus (2,6% bis 5,6%). Bei den NO_x-Emissionen ist dieser Trend noch stärker ausgeprägt. Hier variieren die Wachstumsraten je nach Szenario in einer Spanne zwischen 1,1% und 4,7%.

Tabelle 19: Wesentliche Ergebnisse der EDF-Szenarien

				1990	2000	2015	2025	2050	2100
Demand									
Base-demand level									
IS92a	Mrd. tkm			332	555	935	1.428	3.556	7.336
IS92c	Mrd. tkm			332	527	816	1.193	2.563	3.169
High-demand level									
IS92a	Mrd. tkm			332	887	1.522	2.803	6.329	11.568
IS92e	Mrd. tkm			332	912	1.659	3.089	7.089	17.389
CO₂									
Base-demand level									
IS92a	Mio. t			550	807	1.210	1.723	3.630	4.693
IS92c	Mio. t			550	770	1.027	1.430	2.640	2.090
High-demand level									
IS92a	Mio. t			550	1.247	1.943	3.557	6.600	7.517
IS92e	Mio. t			550	1.283	2.127	3.960	7.260	10.963
Percent of Global CO₂									
Base-demand level									
IS92a	%			2,1%	2,6%		3,8%	6,8%	6,3%
IS92e	%			2,1%	2,5%		3,5%	5,6%	5,4%
High-demand level									
IS92a	%			2,1%	4,1%		7,9%	12,4%	10,1%
IS92c	%			2,1%	4,3%		9,4%	17,6%	20,2%
NO_x above 9 km									
Base-demand level									
IS92a	Mio. t			1,15	1,51	2,03	2,73	4,87	4,90
IS92c	Mio. t			1,15	1,42	1,50	2,29	7,56	2,18
High-demand level									
IS92a	Mio. t			1,15	2,30	3,30	5,63	8,89	7,86
IS92e	Mio. t			1,15	2,38	3,61	6,19	9,78	11,48

Quelle: Vedantham/Oppenheimer 1998

Langfristig, d. h. bis zum Jahr 2100, wächst die Nachfrage im Luftverkehr je nach Nachfragevarianten im Basisfall (IS92) sogar um den Faktor 22 bzw. 35. Selbst im Szenario mit den geringsten Wachstumserwartungen (IS92b, Base-demand) wächst die Nachfrage um 3,4% pro Jahr und verzehnfacht sich damit fast. Im dynamischsten Szenario (IS92e, High-demand) wächst die Flugverkehrsnachfrage jährlich sogar um 5,3% und führt damit zu einem Wachstum der Luftverkehrsnachfrage um den Faktor 52.

Bedingt durch Verbesserungen im Betrieb und in der Technik wachsen die Emissionen zwar nicht so stark wie die Nachfrage. Letztlich aber reichen die langfristig erzielbaren Verbesserungen bei weitem nicht aus, um die absoluten Emissionen des Luftverkehrs auch nur zu stabilisieren. Langfristig könnte deshalb der Anteil des Luftverkehrs an den globalen CO₂-Emissionen von derzeit etwa 4% im Basisfall auf 6% oder 10% ansteigen. Lediglich im Falle eines sehr langsamen Wachstums beim BIP und bei der Nachfrage nach Luftverkehrsleistungen könnte der Anteil des Luftverkehrs an den globalen CO₂-Emissionen etwa auf dem heutigen Niveau verbleiben. Im Falle sehr dynamischen Wachstums (IS92e, High-demand) könnte allerdings der Anteil der Luftverkehrs auf über 20% ansteigen.

Angesichts der Aussichten empfehlen Vedantham/Oppenheimer (1998) die Risiken für die globale Umwelt durch eine frühzeitige Begrenzung der Luftverkehrsemissionen zu

reduzieren. Darüber hinaus könnten diese Risiken auch durch die Entwicklung „grüner Flugzeuge“ in Kombination mit einem verstärkten Technologietransfer in die Weltregionen mit besonders starkem Wachstum im Luftverkehr verringert werden.

5.4 AERO-Modellsystem

Das AERO-Modellsystem (MTPWW 2002) wurde im Auftrag des FESG entwickelt. Es ist eines der ersten umfassenden Modelle mit dem die ökologischen und ökonomischen Wirkungen von Politikmaßnahmen im internationalen Luftverkehr abgebildet werden können. Neben regulatorischen Maßnahmen wie Verkehrsbeschränkungen für ältere Flugzeuge bzw. Flugzeuge mit älterer Technologie und operativen Maßnahmen wie Begrenzung der Reiseflughöhe oder der Geschwindigkeit wurden mit dem Modell auch ökonomische Maßnahmen sowie die Kombination verschiedener Maßnahmen in Form eines Instrumentenmixes analysiert. Bei den ökonomischen Maßnahmen wurden neben den Auswirkungen verschiedener Arten von Steuern und Gebühren auch die Effekte eines globalen Emissionshandels in verschiedenen Ausgestaltungsvarianten untersucht.

Das Basisjahr des AERO-Modellsystems ist 1992, da für dieses Jahr eine weit gehend vollständige Datenbasis verfügbar ist. Ein Vergleich mit den Basisdaten der Szenarien von NASA, ANCAT und DLR (Abschnitt 5.1) zeigt, dass insbesondere der Treibstoffverbrauch und die CO₂-Emissionen des AERO-Modellsystems im Basisjahr aufgrund einer umfassenderen Datenbasis um etwa 17 bis 20% höher liegen (Tabelle 20).⁵⁵ Da 1997 das letzte Jahr ist, für das bei der Entwicklung des Modells ein entsprechend vollständiger Datensatz vorlag, wurde das Modell anhand der Daten des Jahres 1997 kalibriert.

Tabelle 20: Treibstoffverbrauch und Emissionen im zivilen Luftverkehr, 1992

		NASA	ANCAT	DLR	AERO-MS
Treibstoffverbrauch	Mio. t	114	114	112	134
CO ₂ -Emissionen	Mio. t	359	360	354	423
NO _x -Emissionen	Mio. t	1,4	1,6	1,6	1,7
NO _x -Emissionsfaktor	g/kg	12,6	14,0	14,2	12,6

Quelle: MTPWW 2002

Aufbauend auf dieser Datenbasis und unter Berücksichtigung von Prognosen der ICAO zur Entwicklung der Nachfrage im Passagier- und von Boeing im Frachtverkehr wurde das Szenario AERO-M für die Entwicklung bis 2010 und 2020 definiert, das als Refe-

⁵⁵ Andere Datenbasen weisen jedoch ähnlich hohe Werte aus (US DOE 1999, Balashov/Smith 1992 Shell 1993).

renz für die Bewertung der verschiedenen Politikmaßnahmen dient.⁵⁶ Neben den Annahmen zur Nachfrageentwicklung liegen dem Referenzszenario unter anderem folgende Prämissen zu Grunde:

- Der NO_x-Emissionsfaktor wird sich bis 2010 nicht wesentlich verbessern. Da eine Verbesserung der Treibstoffeffizienz in der Vergangenheit meist zu einer Verschlechterung der NO_x-Emissionswerte geführt hat, dürfte eine gleichzeitige Verbesserung von Treibstoffeffizienz und NO_x-Emissionsfaktor zu optimistisch ausfallen.
- Das durchschnittliche Stilllegungsalter von Flugzeugen steigt mit der Zeit an und liegt im Jahr 2010 bei Flugzeugen mit weniger als 180 Sitzen bei 28 Jahren und bei Flugzeugen mit mehr als 180 Sitzen bei 31 Jahren.
- Der Zeitaufwand für Wartung und Instandhaltung ist proportional zur Flugstunde und ändert sich über den Betrachtungszeitraum nicht.
- Der reale Treibstoffpreis bleibt konstant und verharrt auf dem Niveau von 1992.
- Die Lande- und Streckengebühren steigen um real 2% pro Jahr.
- Die Investitionskosten für Flugzeuge sowie die Personalkosten steigen um real 1% pro Jahr.
- Das Flottenwachstum entspricht dem Wachstum des Verkehrsaufkommens.
- Zusätzliche Einschränkungen durch Wetter oder Flugsicherung werden nicht erwartet. Mögliche Einschränkungen aufgrund des wachsenden Verkehrsaufkommens können durch Verbesserungen des Air Traffic Management vollständig kompensiert werden.
- In Europa werden zukünftig mehr Hochgeschwindigkeitszüge eingesetzt.
- In Abhängigkeit von der Preiselastizität überwälzen die Fluggesellschaften die Kosten politischer Minderungsmaßnahmen auf die Passagiere, so dass sie den Profit pro bereitgestellter Sitzplatzkapazität konstant halten können.

Ausgehend von diesen Annahmen wird zunächst das Szenario AERO-M entwickelt, das als Referenz für die Bewertung verschiedener Politikmaßnahmen dient. Von den verschiedenen Szenarien, in denen die Auswirkungen dieser Politikmaßnahmen analysiert werden ist im Rahmen der hier vorliegenden Studie insbesondere das Szenario von Interesse, in dem ein offenes Emissionshandelssystem im Luftverkehr modelliert wird.

⁵⁶ Für die Durchführung von Sensitivitätsanalysen, die hier jedoch nicht weiter betrachtet werden, wurden darüber hinaus 4 weitere Szenarien definiert: Während bei AERO-M ein durchschnittliches Nachfragewachstum von 5,5% pro Jahr unterstellt wird, liegt dieser Wert in AERO-LD (Low demand) bei 3,4% und in AERO-HD (High demand) bei 7,5% pro Jahr. Darüber hinaus wurde zwei weitere Szenarien mit minimalem bzw. maximalem Emissionswachstum (AERO-L, AERO-H) definiert. In diesen beiden Szenarien weichen sowohl die Annahmen zur Entwicklung der Treibstoffeffizienz als auch die Annahmen zur Entwicklung der Nachfrage von den im Szenario AERO-M unterstellten Annahmen ab.

Ebenso wie von uns vorgeschlagen wird im Rahmen der Analysen mit dem AERO-Modellsystem ein Downstream-System betrachtet, in dem die Fluggesellschaften die verpflichteten Akteure sind. Anders als von uns vorgeschlagen, erfasst das Modell jedoch lediglich CO₂-Emissionen und damit nur einen Teil der gesamten Treibhauswirkung des Luftverkehrs. Über diese Annahmen hinaus wurden bei der Modellierung des Emissionshandels folgende Überlegungen zu Grunde gelegt:

- Da der Luftverkehr nur für einen geringen Anteil an den globalen CO₂-Emissionen verantwortlich ist, ist er ein so genannter Preisnehmer. Der Zertifikatspreis wird deshalb nur durch Angebot und Nachfrage nach Emissionsrechten auf dem globalen Zertifikatsmarkt bestimmt und nicht oder allenfalls geringfügig durch die Ausgestaltung des Emissionshandelssystems im Luftverkehr beeinflusst. Bei den Modellierungen des Emissionshandels im Luftverkehr werden deshalb verschiedene Zertifikatspreisniveaus (16, 32 und 63 US\$/t CO₂)⁵⁷ exogen vorgegeben, um die Auswirkungen auf den Luftverkehr zu analysieren.
- Als Minderungsziel wird wie im Kioto-Protokoll eine Reduzierung der CO₂-Emissionen um 5% gegenüber dem Niveau von 1990 unterstellt.⁵⁸
- Sofern die Emissionsrechte kostenlos vergeben werden, werden sie unter Berücksichtigung des Minderungsziels entsprechend der CO₂-Emissionen im Jahr 1990 zugeteilt (Grandfathering).
- Bei einer Auktionierung der Emissionsrechte können die Luftfahrtgesellschaften Emissionsrechte im Umfang des Minderungsziels von einer globalen Handelsbehörde erwerben. Zusätzlich benötigte Zertifikate müssen von anderen Sektoren zugekauft werden. Da von einem unregulierten Markt ausgegangen wird, sind der Preis bei der Auktionierung und der Preis auf dem globalen Zertifikatsmarkt identisch.

In verschiedenen Modellläufen wurden sowohl die Auswirkungen einer Auktionierung der Emissionsrechte bei verschiedenen Zertifikatspreisniveaus als auch die Auswirkungen unterschiedlicher Verhaltensweisen der Fluggesellschaften im Falle einer kostenlosen Vergabe der Emissionsrechte (Grandfathering) untersucht. Zusätzlich wird die Kombination der kostenlosen Zuteilung von Emissionsrechten mit einer freiwilligen Selbstverpflichtung zur frühzeitigen Stilllegung älterer Flugzeuge betrachtet.

Bei der kostenlosen Vergabe der Emissionsrechte entstehen bei den Fluggesellschaften zunächst zusätzliche Gewinne im Umfang des Wertes dieser Emissionsrechte, der sich aus dem Volumen der zugeteilten Emissionsrechte multipliziert mit dem Zertifikatspreis ergibt (32 US\$/t CO₂). Grundsätzlich können drei Optionen, wie die Unter-

⁵⁷ Dies entspricht einer Steuer von 0,05, 0,10 bzw. 0,20 US\$/kg Treibstoff.

⁵⁸ Darüber hinaus werden allerdings auch Sensitivitätsanalysen mit weniger ambitionierten Zielen untersucht, bei denen von einer Minderung des Wachstums der Emissionen zwischen 1992 und 2010 um 50 bzw. 25% ausgegangen wird. Diese Varianten werden hier allerdings nicht näher betrachtet.

nehmen mit diesen so genannten Windfall Profits umgehen können, differenziert werden:

- Option A: Sie können die Profite vollständig einbehalten und damit ihren Gewinn erhöhen. Dies würde allerdings zu einer Preiserhöhung bei den Flugtickets im selben Umfang führen, als wenn die Emissionsrechte versteigert worden wären.
- Option B: Sie können die Profite vollständig an ihre Kunden weitergeben und damit sicherstellen, dass die Ticketpreise durchschnittlich nur in dem Umfang steigen, wie Kosten für zusätzlich zu erwerbende Emissionsrechte entstehen.
- Option C: Sie können die Profite teilweise einbehalten und den anderen Teil an ihre Kunden weitergeben.

Option A ist also weit gehend identisch mit einer Auktionierung der Emissionsrechte, allerdings mit dem Unterschied, dass das Aufkommen der Auktionierung nicht an die Staaten, sondern an die Unternehmen fließt. Theoretisch lässt sich kaum bestimmen, welche dieser drei Optionen in der Realität eintritt, da diese von verschiedenen Faktoren beeinflusst werden. So hängen beispielsweise die Preisüberwälzungsmöglichkeiten der Fluggesellschaften davon ab, wie sich ihre Wettbewerbsposition gegenüber alternativen Transportmitteln wie Hochgeschwindigkeitszügen verändert (Substitutionselastizität) und wie die Nachfrage nach Flügen auf Preisänderungen reagiert (Nachfrageelastizität). Aus diesem Grunde wurden im Rahmen der Untersuchungen mit dem AERO-Modellsystem die potenziellen Auswirkungen aller drei Optionen betrachtet.

Darüber hinaus wurde eine weitere Option D betrachtet, bei der eine Grandfathering-Option (Option C) mit einer freiwilligen Selbstverpflichtung der Luftfahrtgesellschaften kombiniert wird, Flugzeuge die älter als 25 Jahre sind, vorzeitig stillzulegen.

Die Simulationsergebnisse einer Auktionierung der Emissionsrechte bei unterschiedlichen Zertifikatspreisniveaus sind in Tabelle 21 dargestellt.

Tabelle 21: Auswirkungen verschiedener Zertifikatspreise bei einer Auktionierung von Emissionsrechten

		1992	1997	2010			
				AERO-M	16 US\$	32 US\$	63 US\$
Verkehrsleistung	Mrd. RTK		415	828	813	799	774
Veränderung der Verkehrsleistung	%				-1,8%	-3,5%	-6,6%
Flugzeuge älter als 12 Jahre	Stk.		9.206	17.657	17.021	16.509	15.468
Flugzeuge jünger als 12 Jahre	Stk.		10.947	15.350	15.258	15.504	15.058
Treibstoffverbrauch	Mio. t	134	155	242	236	231	221
Spezifischer Treibstoffverbrauch	kg/km		5,16	4,60	4,58	4,54	4,49
CO ₂ -Emissionen	Mio. t	423	489	763	746	729	698
CO ₂ -Emissionen	1992 = 100	100	115	180	176	172	165
Anteil der Minderungen im Luftverkehr	%				5%	10%	18%

Quelle: MTPWW 2002

Bei einer Auktionierung der Emissionsrechte geht die Nachfrage nach Luftverkehrsdienstleistungen im Vergleich zur Referenzentwicklung (AERO-M) in Abhängigkeit vom

Zertifikatspreis bis 2010 um etwa 1,8 bis 6,6% zurück. Der Treibstoffverbrauch geht um 2,3 bis 8,5% zurück, was neben technischen Verbesserungen an den Flugzeugen vor allem auch auf die Strukturveränderungen in der Flugzeugflotte zurückzuführen ist. Denn während im Referenzfall nur 46,5% der Flugzeuge jünger als 12 Jahre sind, steigt dieser Anteil in den Szenarien auf Werte zwischen 47,3 und 49,3%. Auch bei sehr hohen Zertifikatspreisen steigen die CO₂-Emissionen des Luftverkehrs weiter an, liegen in den Maßnahmenszenarien aber zwischen 4 und 15 Prozentpunkte niedriger als in der Referenzentwicklung. Aufgrund der hohen Vermeidungskosten für CO₂ im Luftverkehr wird nur ein geringer Teil der Emissionsminderungen durch Maßnahmen im Luftverkehr selbst erzielt (5 bis 18%). Der Rest der Minderungsverpflichtungen wird durch Erwerb von Zertifikaten aus anderen Sektoren erbracht.

Tabelle 22 zeigt die Auswirkungen verschiedener Verhaltensweisen bei einer kostenlosen Vergabe der Emissionsrechte auf Grundlage der Emissionsniveaus im Jahre 1990 (Grandfathering). Dabei wird ein Zertifikatspreis von 32 US\$/t CO₂ unterstellt.

Tabelle 22: Auswirkungen unterschiedlicher Zuteilungsoptionen, 2010

		AERO-M	Grandfathering			
			A	B	C	D
Verkehrsleistung	Mrd. RTK	828	799	814	812	808
Veränderung der Verkehrsleistung			-3,5%	-1,8%	-2,0%	-2,4%
Flugzeuge älter als 12 Jahre	Stk.	17.657	16.509	17.110	15.891	15.150
Flugzeuge jünger als 12 Jahre	Stk.	15.350	15.504	15.289	16.363	16.685
Treibstoffverbrauch	Mio. t	242	231	236	233	226
Spezifischer Treibstoffverbrauch	kg/km	4,60	4,54	4,57	4,50	4,41
CO ₂ -Emissionen	Mio. t	763	729	746	734	714
CO ₂ -Emissionen	1990 = 100	180	172	176	173	169
Anteil der Minderungen im Luftverkehr	%		10%	5%	8%	14%

Quelle: MTPWW 2002

Wenn die Fluggesellschaften die Windfall Profits der kostenlosen Vergabe von Emissionsrechten vollständig einbehalten (Option A), kommt es erwartungsgemäß zum stärksten Rückgang der Nachfrage (-3,5% gegenüber der Referenzentwicklung). Am geringsten ist der Nachfragerückgang, wenn die Windfall Profits vollständig an die Kunden weitergereicht werden (Option B). Obwohl die Nachfrageminderung in Option D noch vergleichsweise gering ausfällt, gehen Treibstoffverbrauch und CO₂-Emissionen hier am stärksten zurück (-6,4%), weil in diesem Falle der Strukturwandel in der Flugzeugflotte am stärksten ausfällt. Während in den anderen Optionen der Anteil der neuen Flugzeugen von 46,5 auf 47,2 bis 50,7% steigt, erhöht er sich in Option D aufgrund der Selbstverpflichtung zur frühzeitigen Stilllegung älterer Flugzeuge auf 52,4%. Die CO₂-Emissionen könnten durch diese kombinierte Maßnahme 4 Prozentpunkte mehr reduziert werden, als bei einer ausschließlich auf Emissionshandel basierenden Strategie (Option C). Der Löwenanteil der Minderungsverpflichtung (86%) wird

dennoch auch in dieser Varianten durch den Zukauf von Emissionsrechten aus anderen Sektoren erbracht.

Alles in allem zeigen die Simulationen, dass die Nachfrage nach Luftverkehrsleistungen um so stärker zurückgeht, je höher der globale Zertifikatspreis ist. Bei einer kostenlosen Vergabe der Emissionsrechte auf Grundlage der Emissionsniveaus im Jahre 1990 kann der Nachfragerückgang allerdings geringer ausfallen, je nachdem welche Annahmen für die Weitergabe der dabei entstehenden Windfall Profits an die Kunden unterstellt wird. Unabhängig von diesen Annahmen wird jedoch immer nur ein geringer Anteil der Emissionsminderungen im Luftverkehrssektor selbst erbracht. Dies ist vor allem darauf zurückzuführen, dass hier lediglich CO₂ als Bemessungsgrundlage gewählt wurde und die Vermeidungskosten für CO₂ im Luftverkehr relativ hoch ausfallen. Andere Maßnahmen zur Verringerung der Treibhauswirkung des Luftverkehrs werden durch ein derartiges Emissionshandelssystem nicht adressiert. Letztlich kann dies dazu führen, dass die Treibhauswirkungen des Luftverkehrs tatsächlich geringer ausfallen als hier angenommen oder sogar steigen, da die Treibhauswirkungen anderer klimawirksamer Substanzen wie NO_x, Kondensstreifen oder Zirruswolken bei einer ausschließlich auf CO₂ ausgerichteten Optimierung vielfach ansteigen. Solche Trade-offs werden jedoch von dem hier untersuchten Emissionshandelssystem nicht erfasst. Somit können die Ergebnisse dieser Simulationen allenfalls bedingt auf das von uns vorgeschlagene Emissionshandelsmodell mit einer Bemessungsgrundlage, die die gesamte Treibhauswirkung des Luftverkehrs erfasst, übertragen werden.

6. Optionen zur Minderung der Klimawirksamkeit des Luftverkehrs

Im Rahmen eines Emissionshandelssystems steht jeder der beteiligten Akteure permanent vor der Entscheidung, Emissionen selbst kostengünstig zu vermeiden oder, wenn es für ihn effizienter ist, Emissionsrechte von anderen Akteuren zu erwerben. Insofern stellt sich die Frage, welche Optionen zur Minderung der Klimawirksamkeit im Luftverkehr selbst bestehen. Dabei kann zwischen technischen Maßnahmen an den Flugzeugen und Vermeidungsoptionen beim Betrieb von Flugzeugen unterschieden werden.

Optionen technischer Art sind beispielsweise die Klimaoptimierung von Triebwerken sowie die Verbesserung der aerodynamischen Effizienz von Flugzeugen. Zu den Vermeidungsoptionen beim Betrieb zählen die verbesserte Instandhaltung, die Optimierung des Air Traffic Managements (ATM) sowie die Optimierung der Flugrouten unter Klimagesichtspunkten.

Um die Auswirkungen eines Emissionshandelssystems bewerten zu können, erscheint eine Analyse der spezifischen Vermeidungskosten unerlässlich, da hiervon einige Fragen der Ausgestaltung abhängen, wie etwa die Festlegung des Minderungsziels für den Luftverkehr oder die Entscheidung über ein offenes oder geschlossenes Handelssystem.

6.1 Flugroutenoptimierung unter Klimagesichtspunkten

Die Entstehung von Kondensstreifen und Zirruswolken kann in der Regel dadurch vermieden werden, dass Schichten mit entsprechend eisgesättigten und feuchten Luftmassen nicht durchflogen werden.⁵⁹ Bei der Flugroutenoptimierung unter Klimagesichtspunkten geht es deshalb darum, solche Schichten zu umgehen indem die Flughöhe oder die Flugroute verändert oder die Periode des Flugbetriebes an die klimatischen Gegebenheiten angepasst wird.⁶⁰ Bisher werden die Flugrouten nach Berücksichtigung

⁵⁹ Der Beitrag von Zirruswolken zur Klimawirksamkeit des Luftverkehrs ist derzeit wissenschaftlich noch nicht abschließend geklärt. Es gibt jedoch deutliche Hinweise darauf, dass Zirruswolken u.a. durch Alterung von persistenten Kondensstreifen entstehen. Durch Flugroutenoptimierung, bei der die Entstehung von Kondensstreifen vermieden wird, könnte dementsprechend auch die Entstehung von Zirruswolken vermieden werden. Lee (2003) schätzt, dass hierdurch bis zu 44,5% der Kondensstreifen vermieden werden können. Bei der Abschätzung der spezifischen Vermeidungskosten einer Flugroutenoptimierung wird der mögliche Beitrag der Zirruswolken deshalb im Rahmen von Sensitivitätsrechnungen berücksichtigt.

⁶⁰ Es könnte aus klimapolitischen Gründen auch sinnvoll sein, statt abends tagsüber zu fliegen, da persistente Kondensstreifen zeitlich verschoben zu den Emissionen des Luftverkehrs klimawirksam werden und ihre Klimawirksamkeit in der Nacht größer ist als tagsüber (Mannstein 2003a).

sichtigung von Wetterverhältnissen und Sicherheitsaspekten jedoch in erster Linie unter ökonomischen Gesichtspunkten nach Flugzeit und Treibstoffverbrauch optimiert.⁶¹

Bei geringerer Flughöhe verschlechtert sich aufgrund dichter Luftmassen die Aerodynamik der Flugzeuge, was u. a. zu erhöhtem Treibstoffverbrauch und längeren Flugzeiten führen kann. Denn mit einer geringeren Flughöhe verkürzt sich einerseits die Zeit und damit der Treibstoffverbrauch während des Steig- und Sinkfluges (climb and descent phase). Andererseits steigt jedoch der Treibstoffverbrauch während des Reiseflugs an, sowohl durch eine verlängerte Reiseflugphase als auch durch Einbußen der aerodynamischen Effizienz des Flugzeugs. Der Nettoeffekt ist abhängig von den Größenordnungen beider Effekte (Williams et al. 2002b) und kann für Kurz- und Langstreckenflüge erheblich variieren.⁶²

Bedingt durch die Verschlechterung der aerodynamischen Effizienz steigen bei einer Reduzierung des Fluglevels die CO₂-, H₂O- und NO_x-Emissionen zunächst an. Während die Klimawirksamkeit durch den erhöhten CO₂- und H₂O-Ausstoß ansteigt, führen die NO_x-Emissionen, trotz der erhöhten Emissionsmengen zu einer geringeren Bildung von Ozon, da sie bei geringerer Flughöhe emittiert werden. Folglich weisen sie auch eine geringere Klimawirksamkeit auf. Darüber hinaus kann durch die Verringerung der Flughöhe die Entstehung von Kondensstreifen und unter Umständen die von Zirruswolken vermieden werden, so dass der Nettoeffekt im Hinblick auf die Klimawirksamkeit deutlich positiv ist.

Über den Verlust an aerodynamischer Effizienz hinaus muss zur Bewertung der Flugroutenoptimierung auch die Restriktion des Flugraums berücksichtigt werden. Denn insbesondere im europäischen Luftraum sind auf bestimmten Routen die Kapazitäten weit gehend ausgeschöpft. Durch eine Beschränkung des Flugraums könnte es hier zu Engpässen kommen. Insofern ist die systematische Umsetzung der Flugroutenoptimierung unter Klimagesichtspunkten an die Einführung des so genannten „Free flight concept“⁶³ gebunden, durch das die Kapazitäten des Luftraums wieder erheblich ausgedehnt werden könnten.

⁶¹ Eine derartige Flugroutenoptimierung ist an sich nicht neu und wird im Bereich militärischer Flüge schon seit längerem praktiziert. Aus Sicherheitsgründen werden Flughöhen, in denen mit hoher Wahrscheinlichkeit Kondensstreifen entstehen, vorab bestimmt und während des Fluges gemieden (Sausen 2002).

⁶² Im Vergleich zu einem treibstoffoptimierten Flug fällt der Nettoeffekt immer negativ aus. Bei Langstreckenflügen ist der Nettoeffekt tendenziell größer als bei Kurzstreckenflügen, da das Verhältnis zwischen dem in der Climb-Phase vermiedenen und dem zusätzlichen Treibstoffverbrauch in der Reisepflugphase bei Langstreckenflügen niedriger ist.

⁶³ Beim Free flight concept haben die Piloten die Möglichkeit, Flugroute, Flughöhe und Geschwindigkeit in Echtzeit zu wählen. Während die Piloten heute ausschließlich den Instruktionen der Flugsicherung folgen und sich an einen engen Flugplan halten müssen, würden nach diesem Konzept weitere Echtzeitinformationskanäle (On-board Instrumente, Kommunikation mit Piloten anderer Flugzeuge etc.) in die Flugplanung einbezogen. Dadurch könnte die Sicherheit der Flüge auch ohne Einhaltung des strengen Flugplans gewährleistet und die Kapazität des Flugraums deutlich vergrößert werden.

Im Folgenden werden verschiedene Forschungsprojekte vorgestellt, in denen Potenziale der Flugroutenoptimierung zur Vermeidung von Kondensstreifen analysiert wurden.

6.1.1 Aktuelle Forschungsergebnisse

Die Auswertung der bestehenden Literatur und Forschungsergebnisse liefern unterschiedliche Einschätzungen hinsichtlich des Vermeidungspotenzials von Kondensstreifen durch Flugroutenoptimierung, was im Wesentlichen auf die grundlegend unterschiedlichen Untersuchungsansätze zurückzuführen ist.

Williams et al. (2002a und 2002b) und AvioPlan (1999) untersuchten beispielsweise die *vollständige* Vermeidung von Kondensstreifen auf einer bzw. zwei Flugrouten innerhalb eines Basisjahres. Im TRADEOFF-Projekt (Fichter 2003) hingegen wird das gesamte Treibhausgasminderungspotenzial durch die Vermeidung von Kondensstreifen abgeschätzt. Dabei werden nur solche Potenziale berücksichtigt, bei denen die Distanz unverändert bleibt, so dass die Potenziale zu *vergleichsweise geringen Kosten* zu realisieren sind.

6.1.1.1 Reduzierung der Klimawirksamkeit des Luftverkehrs durch Restriktion der Reiseflughöhe

Williams et al. (2002a, 2002b)⁶⁴ haben anhand von Simulationsmodellen die Auswirkungen der Klimaoptimierung von Flugrouten auf Flugzeit und Treibstoffverbrauch untersucht. Darüber hinaus wurde auch untersucht, welche Konsequenzen bei der Flugsicherung zu erwarten wären. Die erste Untersuchung bezieht sich auf den *europäischen Luftraum* vorwiegend mit Kurzstreckenflügen (2002a). In der zweiten Untersuchung wird der *nordamerikanische und nordatlantische Flugraum* überwiegend mit Langstreckenflügen von bis zu 6.000 nm betrachtet (2002b).

Tabelle 23: Änderung von Treibstoffverbrauch und Flugzeit bei Beschränkung der Flughöhe im europäischen Luftraum

Maximale Flughöhe	Monate	Zunahme des Treibstoffverbrauchs im Vergleich zum Referenzflug	Anteil der Flüge mit einer Flugzeit		
			erhöht	unverändert	reduziert
- ft -		- % -	- % -		
24.000	Februar	7,2	45	35	20
25.000	Jan., März, Nov., Dez.	5,8	32,5	36	33,5
26.000	April	5,3	27	37	36
29.000	Mai, Oktober	2,7	12	48	40
31.000	Juni, Juli, August, Sept.	1,6	4	60	36
Durchschnitt	über ein Jahr	3,9	20,2	46	34,5

Quelle: Williams et al. 2002a

⁶⁴ Die Titel der beiden Studien lauten: „Reducing the climate impact of aviation by restricting cruise altitudes“ und „Air Transport Cruise Altitude Restrictions to Minimize Contrail Formation“.

Ausgangspunkt für die Bewertung ist jeweils ein Referenzflug mit einer treibstoffoptimierten Flugroute. Für die klimaoptimierten Flugrouten wird angenommen, dass die Reiseflughöhe des gesamten Fluges zur sicheren und vollständigen Vermeidung von Kondensstreifen verringert wird.⁶⁵ Die wichtigsten Ergebnisse der Untersuchung für den europäischen Luftraum im Hinblick auf Treibstoffverbrauch und Flugdauer sind in Tabelle 23 (Seite 122) aufgeführt.

Für die vollständige Vermeidung von Kondensstreifen im *europäischen Luftraum* ist nach Williams et al. (2002a) je nach Jahreszeit eine Beschränkung der Flughöhe auf 31.000 ft (9.450 m) bzw. 24.000 ft (7.315 m) notwendig. Die Auswirkungen dieser Restriktion auf Flugzeit und Treibstoffverbrauch hängen sowohl vom Flugzeugtyp als auch von der Flugdistanz ab. Je nach Jahreszeit und notwendiger Änderung der Flughöhe variiert der Mehrverbrauch zwischen 1,6 und 7,2%. Im Mittel liegt der Mehrverbrauch bei 3,9%. Die CO₂-Emissionen steigen – aufgrund des linearen Zusammenhangs – im gleichen Umfang an. Die Zunahme der NO_x-Emissionen hängt dagegen stark von der eingesetzten Technik ab.

Zur Bewertung der Flugroutenoptimierung in Hinblick auf die Restriktionen im Flugraum untersuchten Williams et al. (2002a) die Zahl der betroffenen Flugbewegungen. Bei einer Beschränkung der Flughöhe auf 24.000 ft (7.315 m) wären zwei Drittel der europäischen Flüge betroffen während von der Beschränkung auf 31.000 ft (9.450 m) lediglich 40% der innereuropäischen Flüge betroffen wären.

Die Flugzeit kann durch eine Veränderung der Flughöhe sowohl ab- als auch zunehmen. In ca. einem Drittel der Flugbewegungen blieben die Flugzeiten unverändert oder würden etwas kürzer. In einem Fünftel der Fälle nahm die Flugzeit jedoch bis zu 17 Minuten zu. Der Einfluss auf die Flugzeit liegt also in der Größenordnung der täglichen Variabilität. Williams et al. (2002a) folgern daraus, dass die Veränderung der Flugzeit kein Hemmnis bei der Einführung von Flughöhenbeschränkungen zur Vermeidung von Kondensstreifen sein dürfte.

Die Ergebnisse zeigen darüber hinaus eine starke Abhängigkeit vom Flugzeugtyp. Während die Restriktionen bei bestimmten Flugzeugen des Herstellers Mc Donnell Douglas zu Verkürzungen der Flugzeit führten, waren vor allem die Flugzeugtypen Boeing 757 und 777 sowie Airbus A310, A320 und A340 von der Verlängerung der Flugzeit betroffen.⁶⁶

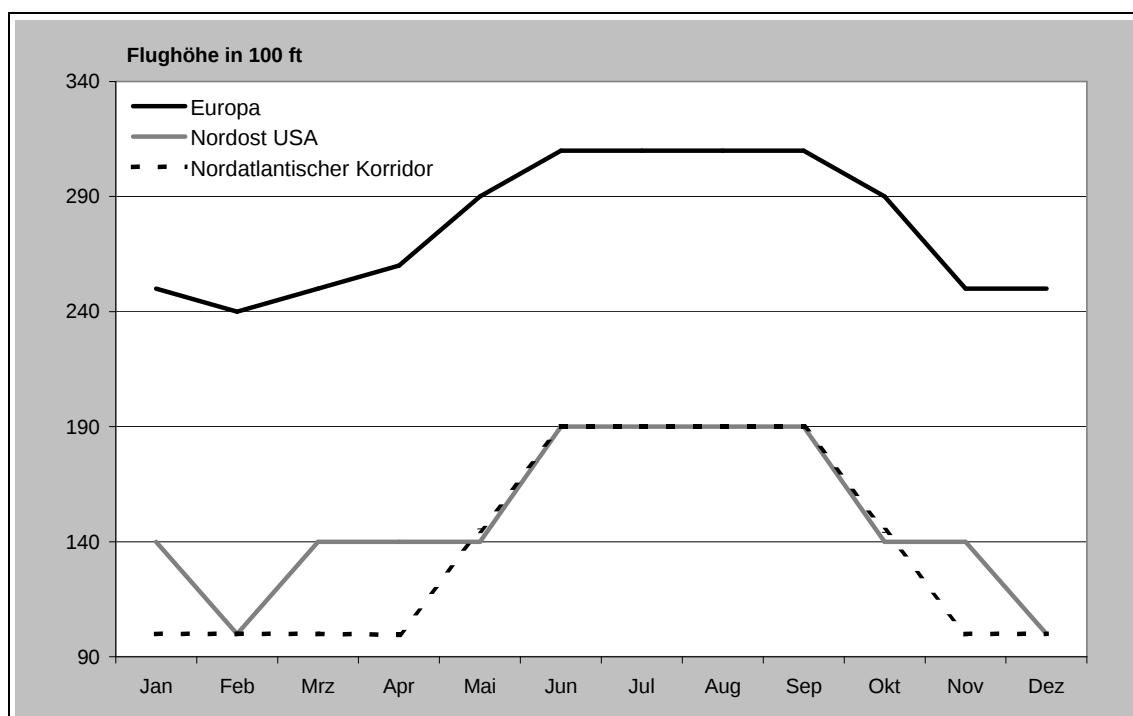
Deutlich andere Ergebnisse liefern vergleichbare Simulationen für den *nordatlantischen Flugkorridor* und den *US-amerikanischen Luftraum* (Williams et al. 2002b). Bei Lang-

⁶⁵ Da Kondensstreifen oft jedoch nur auf Teilen der Flugroute entstehen, werden die Auswirkungen und Kosten der Vermeidung von Kondensstreifen durch diese Vorgehensweise deutlich überschätzt.

⁶⁶ Ursache hierfür sind die Unterschiede in der optimalen Reiseflughöhe der verschiedenen Flugzeugtypen bzw. Triebwerke. Bei Flugzeugtypen mit einer höheren optimalen Reiseflughöhe führt eine Beschränkung der Reiseflughöhe auf 31.000 bzw. 24.000 ft zu einer größeren Verlängerung der Flugzeit als bei Flugzeugtypen mit einer geringeren optimalen Reiseflughöhe.

streckenflügen sind entsprechend größere Auswirkungen auf den Treibstoffverbrauch und die Flugzeit zu erwarten. Für eine vollständige Vermeidung von Kondensstreifen müssten die Flughöhen je nach Jahreszeit auf 9.000 bis 19.000 ft beschränkt werden (Abbildung 12). Diese Ergebnisse sind allerdings nur bedingt verallgemeinerbar, da sie auf der Auswertung der Daten lediglich eines Jahres beruhen. Williams et al. (2002b) weisen deshalb darauf hin, dass die Bildung von Kondensstreifen in Abhängigkeit von den Temperaturverhältnissen von Jahr zu Jahr stark schwanken kann.

Abbildung 12: Jährlicher Zyklus der bei vollständiger Vermeidung von Kondensstreifen zulässigen Fluglevels



Quelle: Williams et al. 2002b

Für einen 3.000 nm langen Flug nimmt der Treibstoffverbrauch um durchschnittlich 10% zu. Bei einer Beschränkung der Flughöhe auf 19.000 ft kann die Verlängerung der Flugzeit je nach untersuchtem Flugzeugtyp 40 bis 120 Minuten betragen. Anders als bei den für den europäischen Luftraum ermittelten Flugzeitverlängerungen gehen diese Änderungen über die Größenordnung der täglichen Variabilität hinaus. Hierdurch können neben den zusätzlichen Treibstoffkosten weitere Kosten entstehen, z. B. aufgrund erhöhter Arbeitszeiten der Flugzeugbesatzungen oder aufgrund einer verringerten Anzahl von Umläufen pro Flugzeug. Darüber hinaus würde die generelle Beschränkung der Flughöhe den Luftraum verdichten und aufgrund der strengen Vor-

schriften der Flugsicherung möglicherweise zu weiteren Einschränkungen führen (Williams et al. 2002b).⁶⁷

6.1.1.2 TRADEOFF-Projekt

Auch im Rahmen des Projektes TRADEOFF (Aircraft Emissions: Contribution of different climate components to changes in radiative forcing – tradeoff to reduce atmospheric impact) wurden die Auswirkungen einer Veränderung der Flughöhe auf die Klimawirksamkeit untersucht. Die zentralen Ziele des EU-Projektes TRADEOFF sind a) die zukünftigen Veränderungen der klimatischen Einflüsse in der Atmosphäre und den Beitrag von Flugzeugemissionen einer schnell wachsenden Flugzeugflotte zum Klimawandel zu ermitteln, b) die großen Unsicherheiten der aktuellen Prognosen bezüglich der Wirkung des zukünftigen Flugverkehrs zu reduzieren und c) der Industrie und Entscheidungsträgern Möglichkeiten zur Reduzierung der Klimawirksamkeit von Flugzeugemissionen aufzuzeigen (CAEP 2003).

Beim TRADEOFF-Projekt wurden nicht nur Kondensstreifen und CO₂-Emissionen gegeneinander abgewogen, sondern auch die Effekte auf Stickoxidemissionen berücksichtigt. Erste Ergebnisse zeigen, dass bei einer Reduzierung der Flughöhe um 6.000 ft (ca. 1,8 km) etwa 5,2% mehr CO₂- und NO_x-Emissionen entstehen. Der jährliche Treibstoffverbrauch würde von 111,5 Mio. t/a auf 117,33 Mio. t/a bzw. die CO₂ Emissionen von 351,7 Mio. t/a auf 370,1 Mio. t/a ansteigen (Fichtner 2003). Gleichzeitig treten jedoch 44,5% weniger sichtbare Kondensstreifen auf. Der Rückgang des Strahlungsantriebs beträgt sogar ca. 47,5% (Sausen/Lee 2003), da zwar bei geringeren Flughöhen mehr NO_x ausgestoßen, aber insgesamt weniger Ozon gebildet wird.

Grewe et al. (2002) haben im Rahmen des TRADEOFF-Projektes die Klimawirkung von Stickoxidemissionen des Flugverkehrs in Abhängigkeit von der Flughöhe untersucht. Bei einer Reduzierung des Fluglevels um ca. 3.300 ft (1.000 m) zeigen die Ergebnisse der mit dem Klima-Chemie-Modell E39/C (Grewe et al. 1999) gekoppelten Simulationen trotz eines erhöhten Treibstoffverbrauchs eine zehnprozentige Abnahme der Ozonbildung, weil Stickoxide in geringeren Höhen zu HNO₃ umgewandelt und ausgewaschen werden und somit aufgrund der kürzeren Lebensdauer eine geringere Konzentration an NO_x-Emissionen vorherrscht (Grewe et al. 2002).

Sausen (2002) geht davon aus, dass eine Berücksichtigung ökologischer Kriterien bei der Flugroutenoptimierung durchaus möglich ist. Aufgrund der unter Klimagesichtspunkten eher niedrigeren Flughöhen kann es zwar unter den gegenwärtigen Regelungen der Flugsicherung zu einer Verdichtung des Flugraums kommen, die jedoch durch die Einführung des Free flight concepts (vgl. Fußnote 63, Seite 121) kompensiert werden könnte.

⁶⁷ Durch die Einführung des Free flight concepts könnten die Kapazitäten des Luftraums jedoch wieder erheblich erweitert werden (vgl. Fußnote 63, Seite 121).

6.1.1.3 Ermittlung umweltoptimierter Flugstrecken

Weitere Hinweise zur Bewertung der Klimawirksamkeit von Flugrouten bietet das von AvioPlan (1999) entwickelte System zur Ermittlung umweltoptimierter Flugstrecken. Neben der Klimawirksamkeit wurden auch ökonomische Kriterien wie Treibstoffverbrauch und Flugzeit betrachtet. Untersucht wurde der *nordatlantische Flugraum*, wobei wegen der saisonalen Variation der Kondensstreifenbildung eine Fallunterscheidung nach Sommer und Winter vorgenommen wurde. Bei der Ermittlung der Klimawirksamkeit wurden sowohl Kondensstreifen und CO₂-Emissionen als auch die chemischen Reaktionsprodukte der Ozonbildung berücksichtigt.

Tabelle 24: Auswirkung einer Flugroutenoptimierung am Beispiel ausgewählter Flugrouten bzw. Flugprofile

	Flugzeit		Kraftstoff		chemische Wirkung		Kondensstreifen		Klimawirkung	
	Winter	Sommer	Winter	Sommer	Winter	Sommer	Winter	Sommer	Winter	Sommer
	- h:mm -		- t -		-		- nm -		-	
Nordroute										
nur Kosten	3:18	3:33	39	41	60	132	280	340	62	94
mehr Kosten	3:19	3:37	39	42	54	116	120	-	49	68
proportional	3:26	3:37	43	42	41	113	-	-	39	56
mehr Umwelt	3:33	3:39	44	44	31	105	-	-	35	65
nur Umwelt	3:55	3:40	45	45	30	104	-	-	35	65
Südroute										
nur Kosten	3:32	3:20	41	39	74	188	390	-	75	95
mehr Kosten	3:32	3:21	42	39	71	173	-	-	50	89
proportional	3:32	3:22	42	40	69	164	-	-	49	86
mehr Umwelt	3:33	3:23	43	41	67	115	-	-	48	83
nur Umwelt	3:34	3:25	44	44	64	147	-	-	48	81
	- v.H. -									
Nordroute										
nur Kosten	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
mehr Kosten	1%	2%	1%	1%	10%	12%	-57%	-	-21%	-28%
proportional	4%	2%	10%	2%	32%	14%	-	-	-37%	-29%
mehr Umwelt	7%	3%	12%	7%	48%	20%	-	-	-44%	-31%
nur Umwelt	8%	4%	13%	8%	50%	21%	-	-	-44%	-31%
Südroute										
nur Kosten	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
mehr Kosten	-	-	2%	1%	4%	8%	-	-	-33%	-6%
proportional	-	1%	3%	2%	7%	13%	-	-	-35%	-9%
mehr Umwelt	-	1%	4%	6%	9%	18%	-	-	-36%	-13%
nur Umwelt	1%	1%	6%	12%	14%	22%	-	-	-36%	-15%
Anmerkung: Bei der Beispielrechnung "nur Kosten" werden lediglich die ökonomischen Optimierungskriterien "Flugzeit" (20%) und "Kraftstoff" (80%) berücksichtigt während bei der Beispielrechnung "nur Umwelt" die Optimierungskriterien "Kraftstoff" (27%), "chemische Wirkung" (40%) und "Klimawirkung" (27%) berücksichtigt werden. Bei den zwischen diesen Extrembeispielen liegenden Berechnungen werden die Optimierungskriterien in abgestuften Wichtungen berücksichtigt.										

Quelle: AvioPlan 1999

Bei einer ausschließlich nach ökologischen Kriterien durchgeführten Optimierung konnten Kondensstreifen nahezu vollständig vermieden werden. Im Vergleich zu einer Optimierung nach rein ökonomischen Kriterien konnte dadurch die Klimawirksamkeit um 20 - 30% verringert werden, wobei allerdings die Kosten um 2% zunahmen. Die maximal erreichbare Reduzierung der Klimawirksamkeit betrug gemäß der Berechnungen mit dem Modell 44%. Die Flugzeit würde dabei um 8% und der Treibstoffverbrauch um

13% ansteigen. Die Ergebnisse der Beispielrechnungen von AvioPlan sind in Tabelle 24 (Seite 126) dokumentiert.

6.1.1.4 Auswirkungen eines Flughöhenlimits

Im Rahmen der Untersuchungen mit dem AERO-Modellsystem (Abschnitt 5.4) wurden globale Minderungsmaßnahmen, wie z.B. ein Flughöhenlimit zur Vermeidung von Kondensstreifen und zur Reduzierung der Klimawirksamkeit von NO_x modelliert und analysiert. Dabei wurde eine Beschränkung der Reiseflughöhe auf 27.000 bzw. 30.000 ft unterstellt und die Auswirkungen auf Nachfrage, Treibstoffverbrauch und Emissionen untersucht. Allerdings wurden die Auswirkungen auf die gesamte Klimawirksamkeit des Luftverkehrs nicht betrachtet. Die wesentlichen Annahmen und Ergebnisse dieser Analyse sind in Tabelle 25 zusammengestellt.

Tabelle 25: Auswirkung einer Beschränkung der Reiseflughöhe, 2010

		AERO-M	Limit	
			27.000 ft	30.000 ft
Verkehrsleistung	Mrd. RTK	828	823	825
Veränderung der Verkehrsleistung	%		-0,6%	-0,4%
Flugzeuge älter als 12 Jahre	Stk.	17.657	17.092	17.304
Flugzeuge jünger als 12 Jahre	Stk.	15.350	15.335	15.381
Treibstoffverbrauch	Mio. t	258	278	269
Veränderung des Treibstoffverbrauchs	%		7,9%	4,2%
CO ₂ -Emissionen	Mio. t	814	878	848
NO _x -Emissionen	Mio. t	3,49	3,66	3,56
NO _x -Emissionsfaktor	g/kg	13,52	13,16	13,24

Quelle: MTPWW 2002

Die beschränkungsbedingte Abweichung von der treibstoffoptimierten Reiseflughöhe führt dabei zu einer Erhöhung des Treibstoffbedarfs und der Treibstoffkosten von durchschnittlich 4 bis 8%. Die erhöhten Treibstoffkosten werden auf den Konsumenten überwält und führen zu einer geringen Nachfragereduktion von 0,4% bis 0,6%. Darüber hinaus vergrößert die Zunahme des Treibstoffverbrauchs den Anreiz für die Fluggesellschaften, neue, treibstoffeffiziente Flugzeuge einzusetzen und ihre Flotten zu verjüngen.

Interessant an diesen Ergebnissen ist, dass es trotz einer Reduzierung der Flughöhe gegenüber der treibstoffoptimierten Reiseflughöhe um bis zu einem Viertel nur zu einem Treibstoffmehrverbrauch von bis zu 8% kommt. Da es für die Vermeidung von Kondensstreifen oft ausreicht, nur wenige Fluglevels tiefer zu fliegen, dürfte der zusätzliche Treibstoffbedarf für die Vermeidung von Kondensstreifen in der Regel deutlich darunter liegen.

6.1.1.5 Bewertung

Die vorliegenden Forschungsergebnisse zeigen, dass ein bedeutendes Potenzial zur Vermeidung von Kondensstreifen bzw. zur Reduzierung der Klimawirksamkeit des Luftverkehrs durch Flugroutenoptimierung vorhanden ist und dass dieses Potenzial größtenteils zu vertretbaren Kosten realisiert werden kann. Es wird jedoch deutlich, dass das Potenzial der Flugroutenoptimierung je nach Jahreszeit und Flugstrecke stark variiert. Weiterhin spielt bei der Bewertung der Flugroutenoptimierung die Restriktion des Luftraums eine zentrale Rolle. Die Forschungsergebnisse liefern jedoch kein einheitliches Bild darüber, inwieweit dieses Potenzial der Flugroutenoptimierung durch die gegenwärtigen Regelungen der Flugsicherung eingeschränkt wird. Es sollte deshalb untersucht werden, inwieweit die Regelungen der Flugsicherung für eine Flugroutenoptimierung nach ökologischen und ökonomischen Kriterien angepasst werden können und welche Potenziale dabei durch die Harmonisierung des Flugraums und die Einführung des Free flight concepts erschlossen werden können.

6.1.2 Abschätzung der spezifischen Vermeidungskosten von Kondensstreifen und Zirruswolken

Bei der Verminderung der Klimawirksamkeit des Luftverkehrs durch Flugroutenoptimierung entstehen Kosten, insbesondere durch eine Erhöhung des Treibstoffverbrauchs. Anhand der dabei anfallenden spezifischen Vermeidungskosten (US\$/t CO₂ eq.) kann abgeschätzt werden, ob und ggf. in welchem Umfang der Luftverkehr in einem offenen Emissionshandelssystem als Käufer von Emissionsrechten auftritt, oder welche Kosten für die Fluggesellschaften bei Einführung eines geschlossenen Emissionshandelssystems entstehen würden.

Voraussetzung für eine Abschätzung der spezifischen Vermeidungskosten ist eine Bewertung der Klimawirksamkeit von Kondensstreifen und luftverkehrsbedingten Zirruswolken. Aufgrund des aktuellen Stands der Wissenschaft sind solche Bewertungen derzeit zwar noch mit Unsicherheiten behaftet, durch die Abbildung möglicher Bandbreiten kann dennoch abgeschätzt werden, in welcher Größenordnung die spezifischen Vermeidungskosten liegen werden.

Für die Abschätzung der spezifischen Vermeidungskosten werden deshalb typische Flugrelationen für einen Mittel- und einen Langstreckenflug im Detail ermittelt. Obwohl die Ergebnisse für andere Flugzeugtypen oder andere Flugrouten grundsätzlich von diesen Abschätzungen abweichen können, dürfte die Größenordnung an Hand dieser typischen Beispielflüge bereits deutlich erkennbar sein.

6.1.2.1 Datengrundlage und zentrale Annahmen

6.1.2.1.1 Betrachtete Flugstrecken und Standardflugzeuge

Die spezifischen Kenndaten der für die Abschätzung zu Grunde gelegten Standardrelationen und der Standardflugzeuge von Airbus für diese Relationen sind in Tabelle 26 (Seite 129) zusammengefasst. Auf eine weitere Betrachtung der Kurzstreckenflüge

(Frankfurt - Rom) wird im Folgenden verzichtet, da in der Regel bei diesen Flügen keine Reiseflughöhe erreicht wird, in der Kondensstreifen entstehen.

Tabelle 26: Spezifische Kenndaten für Standardflugzeuge und –strecken

Einheit		Airbus 320-200	Airbus 330-200	Airbus 340-600
Betrachtete Beispielflüge				
Relation (Beispiel)		Frankfurt - Rom	London - New York	Frankfurt - Los Angeles
Streckenlänge	nm	500	3.000	5.000
Streckenlänge	km	926	5.556	9.260
Standardmäßig eingesetzte Triebwerke		V2500-A1	CF&-80E1A3	Trent 556
Zahl der Plätze	PAX	150	293	380
Gewicht				
MTOW	kg	73.500	230.000	365.000
MZFW	kg	61.000	168.000	256.000
OWE	kg	42.390	119.527	177.705
Durchschnittliche jährliche Flugleistung				
Zahl der Flüge	Stk.	2.006	641	463
Distanz	1.000 km	1.003	1.923	2.315

Quelle: Airbus 2003, Eigene Darstellung

6.1.2.1.2 Änderung des Fluglevels

Für die Mittel- und Langstreckenflugzeuge wird eine durchschnittliche treibstoffoptimierte Reiseflughöhe von 12.500 m (41.000 ft) angenommen.⁶⁸ Ausgehend von diesem Durchschnittswert wird weiterhin unterstellt, dass die Flughöhe zur Vermeidung von Kondensstreifen und Zirkuswolken um drei Fluglevels, d.h. um 1.830 m bzw. 6.000 ft reduziert wird. Denn gemäß den Ergebnissen des TRADEOFF-Projektes (vgl. Abschnitt 6.1.1.2) kann durch eine derartige Minderung der Flughöhe die Entstehung von Kondensstreifen erheblich reduziert werden, ohne dass die Zahl der zurückgelegten Flugkilometer dabei ansteigen muss. Darüber hinaus wird im Rahmen von Sensitivitätsanalysen untersucht, wie sich die Reduktion der Reiseflughöhe um vier bzw. fünf Fluglevels (-2.440 m, -3.050 m bzw. -8.000 ft, -10.000 ft) auf die Klimawirksamkeit der Flugbewegung und die Kostenbelastung der Fluggesellschaft auswirkt. Es ist davon auszugehen, dass das Vermeidungspotenzial bei einer solchen Verminderung des Fluglevels tendenziell größer ist, wobei allerdings auch höhere Kosten entstehen und die zurückzulegende Flugdistanz nicht unverändert bleibt, sondern eher ansteigt.

⁶⁸ Flugzeuge wie der Airbus 330 und 340 fliegen je nach Wetter und Treibstoffreserven zwischen 37.000 und 43.000 ft Höhe (Airbus 2003).

6.1.2.1.3 Treibstoffmehrverbrauch

Grundlage für die Ermittlung des Treibstoffmehrverbrauchs ist das jeweilige Treibstoffverbrauchs- und Emissionsprofil nach AEIG (2001b).⁶⁹ Grundsätzlich hängen der Treibstoffmehrverbrauch und die CO₂-Emissionen bei einer Verringerung der Reiseflughöhe von Flugzeug- und Triebwerkstyp ab. Für eine grobe Abschätzung der spezifischen Vermeidungskosten können aber Durchschnittswerte zu Grunde gelegt werden. In Tabelle 27 ist der in den Abschätzungen zu Grunde gelegte relative Treibstoffmehrverbrauch in Abhängigkeit von der Reduzierung der Reiseflughöhe dargestellt.⁷⁰

Tabelle 27: Treibstoffmehrverbrauch in Abhängigkeit von der Reduzierung der Reiseflughöhe

Reiseflughöhe		Verminderung der Flughöhe	Treibstoffmehrverbrauch
ft	m	m	%
41.000	12.500	0	0,0
39.000	11.890	-610	0,3
37.000	11.280	-1.220	2,3
35.000	10.670	-1.830	5,6
33.000	10.060	-2.440	9,8
31.000	9.450	-3.050	12,2

Quelle: Airbus 2003

Der durch eine Verringerung der Reiseflughöhe induzierte Treibstoffmehrverbrauch ist in der Regel nicht proportional zur zurückgelegten Distanz. Bei kürzeren Distanzen ist der kilometerspezifische Treibstoffmehrverbrauch größer als bei längeren Distanzen, da der Steigflug auf die ursprüngliche Flughöhe überproportional zum Treibstoffverbrauch beiträgt. Für die folgenden Abschätzungen wird dennoch vereinfachend eine Proportionalität zwischen Distanz und Treibstoffmehrverbrauch unterstellt (*Proportionalansatz*).

Die Streckenabhängigkeit des Treibstoffmehrverbrauchs wird aber dennoch im Rahmen einer weiteren Sensitivitätsrechnung berücksichtigt, bei der unterstellt wird, dass der gesamte Flug auf dem niedrigeren Fluglevel durchgeführt wird (*Pauschalansatz*). Dieser Ansatz liefert eine Aussage über den maximal zu erwartenden Treibstoffmehr-

⁶⁹ Der Treibstoffverbrauch und das NO_x-Emissionsprofil auf Basis von AEIG (2001 b) sind beispielhaft für das Flugzeug A 310 in Tabelle 4 in Abschnitt 4.4.3.2 dargestellt.

⁷⁰ Der hier für die Absenkung der Reiseflughöhe um 1.830 m unterstellte Wert ist etwas höher als der im TRADEOFF-Projekt verwendete Wert von 5,2% (Abschnitt 6.1.1.2). Gemäß Angaben von Lufthansa (2003) steigt der Treibstoffverbrauch auf einem Flug von Frankfurt nach San Francisco bei einer Reduzierung der durchschnittlichen Reiseflughöhe um 890 m um 5,1% und bei einer Reduzierung um 1.260 m um 5,9%.

verbrauch. Er basiert auf der Annahme, dass die Flugzeuge nicht flexibel die Fluglevels ändern können und somit längere Distanzen als nötig mit verringerter aerodynamischer Effizienz fliegen müssen. Eine Überschätzung des Treibstoffmehrverbrauchs ist daher vorprogrammiert.

Bei einer Absenkung der Reiseflughöhe erhöht sich zwar der Treibstoffverbrauch für den Reiseflug, der Treibstoffverbrauch für den LTO-Zyklus hingegen bleibt konstant. Hier wird jedoch der prozentuale Treibstoffmehrverbrauch pauschal für den gesamten Flug, also für LTO-Zyklus und Reiseflug ermittelt. Dadurch wird der Treibstoffmehrverbrauch, insbesondere wenn die Absenkung des Fluglevels nur auf Teilstrecken erfolgt, tendenziell überschätzt.

6.1.2.1.4 Bewertung des erhöhten Ausstoßes an NO_x-Emissionen

Bei einer verringerten Flughöhe entstehen aufgrund des erhöhten Treibstoffverbrauchs zunächst auch höhere NO_x-Emissionen. Die spezifische Klimawirksamkeit dieser Emissionen ist jedoch aufgrund der anderen chemischen Zusammensetzung der Atmosphäre geringer (siehe Abschnitt 6.1.1.2).

Bei der Abschätzung der Vermeidungskosten für Kondensstreifen wird im Sinne einer konservativen Abschätzung allerdings vereinfachend unterstellt, dass sowohl das Emissionsniveau als auch die Klimawirksamkeit der NO_x-Emissionen bei niedrigen Flughöhen konstant bleiben. Mit diesem Ansatz wird zwar das NO_x-Emissionsniveau unter-, die Klimawirksamkeit der NO_x-Emissionen jedoch überschätzt.

6.1.2.1.5 Umfang der Kondensstreifenvermeidung

Das Auftreten von Kondensstreifen kann heute von Meteorologen für einzelne Flüge relativ gut vorausgesagt werden. Dennoch gibt es in der Literatur keine fundierten Erkenntnisse oder Daten darüber, auf welchen Flügen und über welche Distanzen tatsächlich Kondensstreifen auftreten.

Denkbar ist es, dass sehr viele Flugbewegungen zur Kondensstreifenbildung führen, aber immer nur auf Teilstrecken. Da die Kondensstreifenbildung u.a. stark von der Temperatur abhängig ist, könnte dies beispielsweise bei Flügen von Süden nach Norden in nördlichen Breitengraden der Fall sein. Bei Transatlantikflügen im Winterhalbjahr in der nördlichen Hemisphäre können dagegen Kondensstreifen auf der gesamten Reiseflugstrecke entstehen. Für die Abschätzung der spezifischen Vermeidungskosten einer Flugroutenoptimierung werden deshalb drei Fälle unterschieden, in denen unterstellt wird, dass Kondensstreifen auf 20, 50 oder 90%⁷¹ der Flugdistanz entstehen. Daten über die Häufigkeit dieser Fälle sind nicht verfügbar. CE (2002a) geht lediglich pauschal davon aus, dass auf etwa 10% der weltweiten Flugdistanz Kondensstreifen entstehen.

⁷¹ 90% entspricht praktisch einer Entstehung von Kondensstreifen auf der gesamten Reiseflugdistanz, da während des LTO-Zyklus solche Flughöhen nicht erreicht werden, in denen Kondensstreifen entstehen können.

6.1.2.1.6 Bewertung der Klimawirksamkeit

Die Klimawirksamkeit von Kondensstreifen und Zirruswolken wurde bereits in Abschnitt 3.2 dargestellt. Für CO₂, NO_x und Kondensstreifen sind die Entstehungsmechanismen und Klimawirkungen inzwischen hinreichend bekannt und bestimmbar. Die Entstehungsmechanismen von Zirruswolken und die Rolle des Flugverkehrs dabei können jedoch derzeit noch nicht abschließend bestimmt werden. Für die Wirkung der Zirruswolken werden deshalb derzeit große Bandbreiten zu Grunde gelegt, die von 0 bis 0,075 W/m² reichen.⁷² Da Zirruswolken u.a. aus Kondensstreifen entstehen, wird im Rahmen der folgenden Sensitivitätsrechnungen deshalb unterstellt, dass durch eine Reduzierung der Reiseflughöhe bzw. durch die Vermeidung von Kondensstreifen auch die Entstehung von Zirruswolken verhindert werden kann. Es wird betrachtet, welche spezifischen Vermeidungskosten entstehen würden, wenn der mögliche Wirkungsbeitrag von Zirruswolken in die Berechnung einbezogen wird. Im Sinne einer konservativen Abschätzung wird allerdings nur die Hälfte des maximalen Wirkungsbeitrags berücksichtigt (0,0375 W/m²), da sich möglicherweise nicht alle Kondensstreifen zu Zirruswolken weiterentwickeln bzw. Zirruswolken nicht ausschließlich aus Kondensstreifen entstehen. Tabelle 28 zeigt die Werte für die Klimawirkungen eines Flugkilometers, die in den verschiedenen Sensitivitätsrechnungen zu Grunde gelegt wurden.

Tabelle 28: Klimawirksamkeit eines Flugkilometers mit Kondensstreifen und Zirruswolken

		Durchschnittlicher Flug mit Kondensstreifen (10% der Flugdauer)	Situation ohne Kondensstreifen und Zirruswolken (90% der Flugdauer)	Kondensstreifen Situation mit Kondensstreifen (10% der Flugdauer)	IPCC-Durchschnitt Situation mit Kondensstreifen und Zirruswolken (10% der Flugdauer)	Kondensstreifen und Zirruswolken Situation mit Kondensstreifen (10% der Flugdauer)
Flugleistung (1992)	Mrd. km	20,70	18,63	2,07	2,07	2,07
Strahlungsantrieb	W/m²	+0,0325	+0,0261	+0,0064	+0,0229	+0,0439
CO ₂	W/m ²	+0,0180	+0,0162	+0,0018	+0,0018	+0,0018
O ₃ (durch NO _x)	W/m ²	+0,0230	+0,0207	+0,0023	+0,0023	+0,0023
CH ₄ (durch NO _x)	W/m ²	-0,0140	-0,0126	-0,0014	-0,0014	-0,0014
H ₂ O	W/m ²	+0,0020	+0,0018	+0,0002	+0,0002	+0,0002
Kondensstreifen	W/m ²	+0,0035		+0,0035	+0,0035	+0,0035
Zirruswolken	W/m ²				+0,0165	+0,0375
SO ₂	W/m ²	-0,0030	-0,0027	-0,0003	-0,0003	-0,0003
Russ	W/m ²	+0,0030	+0,0027	+0,0003	+0,0003	+0,0003
Spezifischer Strahlungsantrieb	pico W/m²/km	+1,6	+1,4	+3,1	+11,1	+21,2
Zirruswolken, Kondensstreifen	pico W/m ² /km	+0,2		+1,7	+9,7	+19,8
Berücksichtigung von Zirruswolken	%				22%	50%
Spezifische Treibhausgaswirkung von Kondensstreifen und Zirruswolken	t CO₂ eq./km			0,04	0,24	0,50

Quelle: Eigene Berechnungen

Die Ermittlungen beruhen auf den Werten für den globalen Strahlungsantrieb des Luftverkehrs nach IPCC (1999). Allerdings wurden die Werte für Kondensstreifen und Zirruswolken entsprechend neueren Erkenntnisse angepasst (Marquart et al. 2003, CAEP

⁷² Der Strahlungsantrieb 0,075 W/m² für Zirruswolken ergibt sich, wenn unterstellt wird, dass Zirruswolken die gleiche optische Dichte aufweisen wie Kondensstreifen.

2003). Teilt man den gesamten Strahlungsantrieb des Luftverkehrs durch die Flugleistung so erhält man den spezifischen Strahlungsantrieb. Zur Umwandlung in CO₂-Äquivalente wurde der spezifische Strahlungsantrieb von Kondensstreifen und Zirruswolken gemäß der Methode von CE (2002a) durch den spezifischen Strahlungsantrieb von CO₂ geteilt. Multipliziert man diesen Quotienten mit dem durchschnittlichen Emissionsfaktor von CO₂ (22 kg/km, IPCC 1999) so kann die spezifische Treibhauswirkung von Kondensstreifen und Zirruswolken ermittelt werden (siehe Abschnitte 4.4.3.3 und 4.4.3.4).

Für die Sensitivitätsrechnungen wurden nun folgende Annahmen unterstellt. Bei der Sensitivität „Kondensstreifen“ wurde lediglich die niedrigere, aktualisierte Treibhauswirkung nach Marquart et al. (2003) berücksichtigt. Hierdurch wird bei der Abschätzung der spezifischen Vermeidungskosten die Obergrenze und bei der Abschätzung des Vermeidungspotenzials die Untergrenze bestimmt. Die Obergrenze des Potenzials und die Untergrenze der spezifischen Vermeidungskosten ergibt sich wiederum, wenn Zirruswolken mit 50% ihres maximal möglichen Wirkungsbeitrags berücksichtigt werden (0,0375 W/m²) (Sensitivität „Kondensstreifen und Zirruswolken“).

Die dritte Sensitivität („IPCC-Durchschnitt“) liegt zwischen diesen Werten. Hierbei wird unterstellt, dass der Wirkungsbeitrag von Kondensstreifen nach neueren wissenschaftlichen Erkenntnissen zwar niedriger ist als noch vom IPCC angenommen, dass aber die Wahrscheinlichkeit eines substanziellen Beitrags von Zirruswolken gestiegen ist. Würde der maximal mögliche Strahlungsantrieb von Zirruswolken (0,075 W/m²) nur zu 22% berücksichtigt (0,0165 W/m²), so ergibt sich eine Treibhausgaswirkung eines Flugzeugkilometers, der den Durchschnittswerten des IPCC (1999) entspricht.

Für die verschiedenen Sensitivitäten werden deshalb in den folgenden Abschätzungen Treibhausgaswirkungen zwischen 0,04 und 0,5 t CO₂ eq./km unterstellt (Tabelle 28).

6.1.2.1.7 Kostenbetrachtung

Eine umfassende Flugrouutenoptimierung unter Klimagesichtspunkten kann nur durchgeführt werden, wenn die Air Traffic Management- und die Air Traffic Control-Systeme entsprechend umgestellt werden. Bei der Einführung der neuen Systeme entstehen Umstellungskosten, die jedoch allenfalls anteilig dem Emissionshandel zuzurechnen sind, da die Umstellung der Systeme aus anderen Motiven ohnehin notwendig ist. Neben diesen Kosten, die bei der Einführung des Emissionshandels entstehen, fallen kontinuierliche zusätzliche Kosten für Monitoring und Kontrolle des Emissionshandelsystems an. Beide Kategorien können derzeit nicht verlässlich abgeschätzt werden und werden deshalb bei der Ermittlung der spezifischen Vermeidungskosten zunächst vernachlässigt.

Auf Seiten der Fluggesellschaften kann es bei einer Optimierung der Flugrouuten unter Klimagesichtspunkten einerseits zu einer Erhöhung der Flugzeiten und andererseits zu höherem Treibstoffverbrauch kommen. Da die Flugzeitverlängerung in einzelnen Fällen zwar substantiell, im Mittel aber etwa im Bereich der normalen Variabilität der Flugzeiten liegt, wird sie bei Bestimmung der zusätzlichen Kosten hier zunächst vernachlässigt.

sig. Insofern werden bei der Abschätzung der spezifischen Vermeidungskosten von Kondensstreifen und Zirruswolken durch klimaoptimierte Flugrouten vor allem die zusätzlichen Kosten für einen erhöhten Treibstoffverbrauch zu Grunde gelegt. Hierfür wird ein durchschnittlicher Kerosinpreis von 0,28 US\$/kg unterstellt.

Bei der Abschätzung der Mehrkosten pro Passagier wird darüber hinaus eine durchschnittliche Auslastung der Flugzeuge von 70% angesetzt.

6.1.2.2 Auswertung der Sensitivitätsrechnungen

Auf Grundlage der zuvor dargestellten Daten und Annahmen können die spezifischen Vermeidungskosten für Kondensstreifen und Zirruswolken abgeschätzt werden. Tabelle 29 (Seite 135) zeigt beispielhaft die wesentlichen Ausgangsdaten und Annahmen sowie die Ergebnisse der Abschätzung für einen Flug von Frankfurt nach Los Angeles mit einem Airbus 340-600.

In der linken Datenspalte werden zunächst die Daten des Referenzflugs beschrieben, bei dem in diesem Falle davon ausgegangen wird, dass über 50% der gesamten Flugdistanz Kondensstreifen und Zirruswolken auftreten. In der rechten Datenspalte wird der gleiche Flug zu Grunde gelegt, allerdings wird hier angenommen, dass auf der Strecke, für die das Entstehen von Kondensstreifen vorhergesagt wurde, die Flughöhe um 1.830 m reduziert wird um die Entstehung von Kondensstreifen (und Zirruswolken) zu vermeiden. Je nachdem welche Annahmen für die Klimawirksamkeit von Kondensstreifen und Zirruswolken zu Grunde gelegt werden, könnten durch das Tieferfliegen bei einem solchen Flug zwischen 190 und 2.310 t CO₂ eq.⁷³ eingespart werden. Dabei entstehen jedoch höhere Kosten insbesondere für den Treibstoff in der Größenordnung von 530 US\$. Daraus ermitteln sich dann spezifische Vermeidungskosten zwischen 0,23 und 2,77 US\$ pro t CO₂ eq. Bereits hier zeigt sich, dass die spezifischen Vermeidungskosten auch für den Fall, dass lediglich die Wirkung von Kondensstreifen berücksichtigt wird, mit 2,77 US\$/t CO₂ eq. immer noch relativ niedrig ausfallen und unter dem Preis liegen, der derzeit für kostengünstige Treibhausgaskredite aus CDM-Projekten erwartet wird (3 - 5 US\$/t CO₂ eq.).

Aufbauend auf diesem – an einem Beispiel dargestellten – Berechnungsmodell wird in den nachfolgenden Abschnitten der Einfluss verschiedener Parameter auf die spezifischen Vermeidungskosten analysiert.

⁷³ Dabei wurde unterstellt, dass der Strahlungsantrieb der Treibhausgaswirkungen des Luftverkehrs entsprechend der in Abschnitt 3.3.1 und 4.4.3.4 dargelegten Überlegungen in CO₂-Äquivalente transformiert werden kann.

Tabelle 29: Vermeidungskosten von Kondensstreifen und Zirruswolken bei einem Flug von Frankfurt nach Los Angeles

Strecke		Frankfurt - Los Angeles	
Flughöhe	m	12.500	10.670
Verminderung der Flughöhe um	m	0	1.830
Emissionen			
Treibstoffverbrauch	t	68	70
Reiseflug	t	66	68
LTO-Zyklus	t	2	2
Kohlendioxid-Emissionen	t	213	219
Wasserdampf-Emissionen (Reiseflug)	t	81	84
Stickoxid-Emissionen (Reiseflug)	kg	1.093	1.093
Sickoxid-Emissionsindex (Reiseflug)	g/kg Treibstoff	17	0
Streckenanteil mit Kondensstreifen	%	50	0
Distanz mit Kondensstreifen	km	4.630	0
Gesamte Treibhauswirkung Kondensstreifen	t CO₂ eq.	586	395
Gesamte Treibhauswirkung IPCC-Durchschnitt	t CO₂ eq.	1.520	395
Gesamte Treibhauswirkung Kondensstreifen & Zirruswolken	t CO₂ eq.	2.708	395
Kohlendioxid	t CO ₂ eq.	213	219
Wasserdampf	t CO ₂ eq.	26	26
Stickoxide	t CO ₂ eq.	149	149
Kondensstreifen	t CO ₂ eq.	198	0
IPCC-Durchschnitt	t CO ₂ eq.	1.132	0
Kondensstreifen & Zirruswolken	t CO ₂ eq.	2.320	0
Einsparpotenzial pro Flug			
Kondensstreifen	t CO ₂ eq.		191
IPCC-Durchschnitt	t CO ₂ eq.		1.125
Kondensstreifen & Zirruswolken	t CO ₂ eq.		2.313
Änderung des Treibstoffverbrauchs			
Mehrverbrauch	t		1,89
Mehrkosten	US\$		530,52
Mehrkosten pro Passagier	US\$		1,99
Spezifische Vermeidungskosten			
Kondensstreifen	US\$/t CO ₂ eq.		2,77
IPCC-Durchschnitt	US\$/t CO ₂ eq.		0,47
Kondensstreifen & Zirruswolken	US\$/t CO ₂ eq.		0,23

Quelle: Eigene Darstellung

6.1.2.2.1 Einfluss des Fluglevels auf die spezifischen Vermeidungskosten

Tabelle 30 zeigt die spezifischen Vermeidungskosten von Kondensstreifen und Zirruswolken in Abhängigkeit davon, um wie viele Fluglevels die Reiseflughöhe reduziert wird. Dabei wurde der Proportionalansatz zu Grunde gelegt, d. h. es wurde unterstellt,

dass das Fluglevel nur über die Distanz reduziert wird, auf der wegen der meteorologischen Verhältnisse Kondensstreifen und Zirruswolken entstehen können.⁷⁴

Tabelle 30: Einfluss des Fluglevels auf die spezifischen Vermeidungskosten (Proportionalansatz)

Flug		Frankfurt - Los Angeles			London - New York		
Reduktion der Reiseflughöhe	m	1.830	2.440	3.050	1.830	2.440	3.050
Treibstoffmehrverbrauch	%	5,6%	9,8%	12,2%	5,6%	9,8%	12,2%
Spezifische Vermeidungskosten							
Kondensstreifen	US\$/t CO ₂ eq.	2,69	4,83	6,10	2,44	4,36	5,51
IPCC-Durchschnitt	US\$/t CO ₂ eq.	0,46	0,80	1,00	0,42	0,73	0,91
Kondensstreifen & Zirruswolken	US\$/t CO ₂ eq.	0,22	0,39	0,49	0,20	0,35	0,44

Quelle: Eigene Berechnungen

In Abhängigkeit davon, in welchem Umfang die Klimawirksamkeit von Zirruswolken bei diesem Ansatz berücksichtigt wird, ergeben sich aus den Abschätzungen für die beiden Bespielflüge bei Senkung der Reiseflughöhe um 3 Fluglevels spezifische Vermeidungskosten zwischen 0,20 und 2,69 US\$/t CO₂ eq.

In der Regel sollte die Reduzierung der Reiseflughöhe um 3 Fluglevels ausreichen um die Entstehung von Kondensstreifen (und Zirruswolken) zu vermeiden. In vielen Fällen dürfte sogar die geringfügige Absenkung der Reiseflughöhe um 1 Fluglevel schon ausreichen, um die Entstehung von Kondensstreifen zu vermeiden (Brockhagen/Lienemeyer 1999). Für den Fall, dass die Reiseflughöhe dennoch um 4 oder 5 Fluglevels (2.440 bzw. 3.050 m) reduziert werden muss, um die Entstehung von Kondensstreifen (und Zirruswolken) zu verhindern, ergeben sich aufgrund des höheren Treibstoffverbrauchs auch höhere spezifische Vermeidungskosten. Sie liegen bei einer Reduzierung der Reiseflughöhe um 5 Fluglevels zwischen 0,44 und 6,10 US\$/t CO₂ eq. je nachdem welche Treibhauswirkung für Zirruswolken unterstellt wird.

Diese Sensitivitätsrechnungen zeigen, dass die spezifischen Vermeidungskosten um so höher ausfallen, je stärker das Fluglevel zur Vermeidung von Kondensstreifen reduziert werden muss. Sie zeigen aber auch, dass die spezifischen Vermeidungskosten für den Fall, dass nur die Vermeidung von Kondensstreifen berücksichtigt und zugleich eine relativ drastische Senkung der Reiseflughöhe um 4 Fluglevels unterstellt wird, mit maximal 4,83 US\$/t CO₂ eq. immer noch in der Größenordnung liegen, die für CDM-Projekte erwartet werden (3 bis 5 US\$/t CO₂ eq.).

⁷⁴ Da bei diesem Ansatz sowohl die vermiedenen Klimawirkungen als auch die zusätzlichen Treibstoffkosten direkt proportional zur Distanz mit reduziertem Fluglevel ist, sind die spezifischen Vermeidungskosten bei diesem Ansatz letztlich unabhängig von der Distanz bei der Kondensstreifen und Zirruswolken entstehen können.

6.1.2.2.2 Einfluss der Distanz mit Kondensstreifen auf die spezifischen Vermeidungskosten

In der Regel kann die Flugdistanz, bei der Kondensstreifen entstehen können, mit den heute in der Meteorologie zur Verfügung stehenden Methoden recht präzise vorhergesagt werden. Eine Reduzierung des Fluglevels ist deshalb auch nur auf den Teilstrecken notwendig, bei denen Kondensstreifen entstehen können. Im Rahmen einer weiteren Sensitivitätsrechnung wird hier dennoch unterstellt, dass der gesamte Flug auf einem niedrigeren Fluglevel durchgeführt wird, um die Entstehung von Kondensstreifen (und Zirruswolken) vollständig zu vermeiden (Pauschalansatz). Dabei wird unterstellt, dass die Reiseflughöhe um 1.830 m (3 Fluglevels) reduziert wird und der Treibstoffverbrauch dabei insgesamt um 5,6% ansteigt.

Tabelle 31: Spezifische Vermeidungskosten in Abhängigkeit von der Flugdistanz mit Kondensstreifen (Pauschalansatz)

Flug		Frankfurt - Los Angeles			London - New York		
Distanz mit Kondensstreifen	%	20%	50%	90%	20%	50%	90%
Spezifische Vermeidungskosten							
Kondensstreifen	US\$/t CO ₂ eq.	15,55	5,56	3,00	13,89	5,03	2,72
IPCC-Durchschnitt	US\$/t CO ₂ eq.	2,34	0,92	0,51	2,12	0,84	0,46
Kondensstreifen & Zirruswolken	US\$/t CO ₂ eq.	1,12	0,45	0,25	1,02	0,41	0,22

Quelle: Eigene Berechnungen

Tabelle 31 zeigt die Ergebnisse dieser Sensitivitätsrechnung. Wenn lediglich die Treibhausgaswirkungen von Kondensstreifen berücksichtigt werden, ergeben sich spezifische Vermeidungskosten zwischen 2,72 und 15,55 US\$/t CO₂ eq. Für den Fall, dass Kondensstreifen nur auf 20% der Flugstrecke auftreten, die Reiseflughöhe aber trotzdem für den gesamten Flug um 1.830 m gegenüber dem treibstoffoptimierten Fluglevel reduziert wird, ergeben sich somit spezifische Vermeidungskosten, die oberhalb der erwarteten Zertifikatspreise im Rahmen des europäischen Emissionshandelssystems liegen (5 bis 10 €/t CO₂ eq.). In diesem Falle dürfte es für die Fluggesellschaften auf jeden Fall attraktiver sein, Emissionskredite aus CDM-Projekten bzw. Emissionsrechte aus dem internationalen Emissionshandel zu erwerben, statt die Treibhausgaswirkungen selbst durch eine klimaoptimierte Wahl der Flugroute zu reduzieren.

Allerdings liegen diesem Fall auch Annahmen zu Grunde, die kaum als realistisch gelten können und die die spezifischen Vermeidungskosten deutlich überzeichnen dürften. Denn obwohl z.B. nur auf 20% oder 50% der Flugstrecke Kondensstreifen auftreten, wird dennoch der gesamte Flug auf einem niedrigeren Fluglevel durchgeführt. Treten Kondensstreifen praktisch auf der gesamten Flugstrecke auf, so entspricht der Pauschalansatz in etwa dem Proportionalansatz. Hier liegen die spezifischen Vermeidungskosten dann in der Spanne zwischen 2,70 und 3,00 US\$/t CO₂ eq., wenn lediglich die Treibhausgaswirkungen der Kondensstreifen einbezogen werden. Berücksich-

tigt man zudem die Klimawirkung von Zirruswolken mit 50% des maximal möglichen Beitrages (0,0375 W/m²), so liegen die ermittelten spezifischen Vermeidungskosten deutlich unter 1,50 US\$/t CO₂ eq.

Die Sensitivitätsrechnung zeigt, dass ein pauschales Tieferfliegen zur Vermeidung von Kondensstreifen zwar die Treibhauswirkung reduzieren könnte, in den Fällen aber, in denen Kondensstreifen nur auf einer Teilstrecke auftreten (=50%), nicht effizient wäre. Lediglich wenn die Wirkung der Zirruswolken mit einem Beitrag zum Treibhauseffekt an der oberen Grenze des aktuellen Unsicherheitsbereichs berücksichtigt würde, wäre auch eine solche relativ pauschale Strategie effizient. Letztlich könnte aber auch in diesem Fall die Effizienz noch gesteigert werden, wenn ausschließlich auf den Teilstrecken die Reiseflughöhe verringert wird, auf denen auch Kondensstreifen auftreten können.

Wichtig für die Etablierung jedweder Maßnahmen zur Begrenzung und Reduzierung der Treibhausgaswirkungen von Kondensstreifen (und Zirruswolken) ist deshalb, dass geeignete Instrumente für eine zeitnahe Vorhersage der Entstehung von Kondensstreifen zur Verfügung stehen.⁷⁵ Falls dies nicht der Fall ist, könnte eine pauschale Absenkung der Reiseflughöhe zwar die Treibhauswirkung des Luftverkehrs deutlich reduzieren, es wäre aber nicht sichergestellt, dass diese Maßnahmen für jeden Flug effizienter wären als Maßnahmen in anderen Sektoren der Wirtschaft.

6.1.2.2.3 Auswirkungen auf Treibstoffkosten

Bezogen auf einen einzelnen Flug zwischen Frankfurt und New York ergeben sich durch die Reduktion der Reiseflughöhe Mehrkosten zwischen 100 und 1.200 US\$. Diese Mehrkosten variieren in Abhängigkeit von den Annahmen bezüglich des Anteils der Distanz mit Kondensstreifen, der Verringerung der Flughöhe und in Abhängigkeit vom zu Grunde gelegten Berechnungsansatz (Tabelle 32).

Tabelle 32: Zusätzliche Treibstoffkosten

		Proportionalansatz									Pauschalansatz			
Verminderung der Flughöhe um	m	1.830			2.440			3.050			1.830	2.440	3.050	
Treibstoffmehrverbrauch	%	5,6%			9,8%			12,2%			5,6%	9,8%	12,2%	
Streckenanteil mit verminderte Flughöhe	%	20%	50%	90%	20%	50%	90%	20%	50%	90%	100%			
Frankfurt - New York, 5.560 km														
Distanz mit verminderter Flughöhe	km	1.111	2.778	5.000	1.111	2.778	5.000	1.111	2.778	5.000	5.556			
Änderung des Treibstoffverbrauchs														
Treibstoffverbrauch	t	38,4	39,0	39,8	38,7	39,8	41,2	38,9	40,2	42,0	40,0	41,6	42,4	
Mehrverbrauch	t	0,4	1,0	1,8	0,7	1,8	3,2	0,9	2,2	3,9	2,0	3,5	4,4	
Mehrkosten	US\$	112	281	505	197	491	884	245	612	1.101	562	983	1.223	
Frankfurt - Los Angeles, 9.260 km														
Distanz mit verminderter Flughöhe	km	1.852	4.630	8.334	1.852	4.630	8.334	1.852	4.630	8.334	9.260			
Änderung des Treibstoffverbrauchs														
Treibstoffverbrauch	t	68,4	69,5	71,0	69,0	70,9	73,5	69,3	71,7	74,9	71,3	74,1	75,7	
Mehrverbrauch	t	0,7	1,8	3,3	1,3	3,2	5,8	1,6	4,0	7,2	3,7	6,4	8,0	
Mehrkosten	US\$	206	515	926	360	901	1.621	449	1.121	2.018	1.029	1.801	2.243	

Quelle: Eigene Berechnungen

⁷⁵ Da solche Prognosen für militärische Flüge bereits seit längerem durchgeführt werden, dürfte die Bereitstellung solcher Instrumente kein grundsätzliches Problem sein (Sausen 2002).

Für einen Flug von Frankfurt nach Los Angeles variieren die Mehrkosten dementsprechend zwischen 200 und 2.250 US\$. Daraus ermitteln sich Mehrkosten pro Flugkilometer von 0,02 bis 0,24 US\$. Auch bei sehr restriktiven Annahmen fallen die Mehrkosten alles in allem doch recht moderat aus.

6.1.2.2.4 Auswirkungen auf die Ticketpreise

Im Falle der Einführung eines Emissionshandelssystems werden die Fluggesellschaften versuchen, die ggf. zusätzlich entstehenden Kosten auf ihre Kunden zu überwälzen. Insofern stellt sich die Frage, welche Kosten sie im Falle klimaoptimierter Flugrouten überwälzen müssten. Für diese Betrachtung wird unterstellt, dass die zusätzlichen Kosten der Flugroutenoptimierung vollständig überwälzt werden können und dass die Flüge im Mittel zu 70% ausgelastet sind.⁷⁶

Tabelle 33: Mehrkosten pro Passagier (Proportionalansatz)

Flug		Frankfurt - Los Angeles			London - New York		
Reduktion der Reiseflughöhe	m	1.830	2.440	3.050	1.830	2.440	3.050
Treibstoffmehrverbrauch	%	5,6%	9,8%	12,2%	5,6%	9,8%	12,2%
Spezifische Vermeidungskosten bei Entstehung von Kondensstreifen auf ... der Strecke							
20%	US\$/Ticket	0,77	1,35	1,69	0,55	0,96	1,19
50%	US\$/Ticket	1,93	3,39	4,22	1,37	2,40	2,98
90%	US\$/Ticket	3,48	6,10	7,59	2,46	4,31	5,37

Quelle: Eigene Berechnungen

In Tabelle 33 sind die Ergebnisse dieser Betrachtung dargestellt. Es zeigt sich dabei, dass die möglichen Zusatzkosten sehr moderat sind und insgesamt deutlich unter 10 US\$ liegen. Bezogen auf den Ticketpreis dürften die zusätzlichen Kosten maximal zwischen 1 bis 2%, in den meisten Fällen jedoch deutlich unter 1% liegen.

6.1.3 Vermeidungspotenzial von Kondensstreifen und Zirruswolken

Neben den spezifischen Vermeidungskosten ist insbesondere das Vermeidungspotenzial für die Bewertung einer Minderungsoption relevant. Denn, wenn das Minderungspotenzial einer Option gering ist, kann der Minderungsbeitrag auch bei sehr niedrigen spezifischen Vermeidungskosten nur gering ausfallen.

⁷⁶ Die absoluten Zusatzkosten der Flugroutenoptimierung sind für einen einzelnen Flug unabhängig vom Minderungsbeitrag. Insofern braucht bei dieser Betrachtung nicht zwischen den verschiedenen möglichen Minderungsbeiträgen der Flugroutenoptimierung differenziert werden.

In Tabelle 34 sind die wesentlichen Daten und Ergebnisse einer Abschätzung einer Vermeidung von Kondensstreifen und Zirruswolken durch klimaorientierte Flugroutenoptimierung für das Jahr 1992 zusammengefasst. Dabei wurden einerseits die in Abschnitt 6.1.2.1 erläuterten Annahmen und andererseits die Ergebnisse des TRADEOFF-Projektes (Abschnitt 6.1.1.2) zu Grunde gelegt.

Tabelle 34: Bestimmung des Vermeidungspotenzials von Kondensstreifen und Zirruswolken

		Kondensstreifen	IPCC-Durchschnitt	Kondensstreifen & Zirruswolken
Spezifische Klimawirksamkeit				
Kondensstreifen & Zirruswolken	t CO ₂ eq./km	0,04	0,24	0,50
CO ₂ - und H ₂ O (3 Fluglevel tiefer)	t CO ₂ eq./km	0,0014	0,0014	0,0014
Aggregierte Treibhausgaswirkung				
Kondensstreifen & Zirruswolken (KS & ZW)	Mio. t CO ₂ eq.	89	506	1.037
Minderung von KS & ZW (3 Fluglevel tiefer)	v.H.	44,5%	44,5%	44,5%
CO ₂ - und H ₂ O (3 Fluglevel tiefer)	Mio. t CO ₂ eq.	3	3	3
Vermeidungspotenzial	Mio. t CO ₂ eq.	37	222	459

Quelle: Eigene Berechnungen

Ausgangspunkt für die Abschätzung ist die spezifische Klimawirksamkeit von Kondensstreifen und Zirruswolken (Tabelle 28). In Verbindung mit der Annahme, dass lediglich auf 10% der weltweiten Flugkilometer (2,07 Mrd. km) Kondensstreifen (CE 2002a) (und Zirruswolken) entstehen kann, daraus die aggregierte Treibhausgaswirkung ermittelt werden. Gemäß der Ergebnisse des TRADEOFF-Projektes können 44,5% der Treibhausgaswirkung durch die Reduzierung der Reiseflughöhe um 3 Fluglevel vermieden werden (siehe Abschnitt 6.1.1.2). Allerdings entstehen dabei zusätzliche Treibhausgasemissionen aufgrund des erhöhten Treibstoffverbrauchs in der Größenordnung von 3 Mio. t CO₂ eq.⁷⁷ Je nachdem, welche Treibhauswirkung von Zirruswolken bei der Abschätzung berücksichtigt wird, reicht das weltweite Minderungspotenzial der Vermeidung von Kondensstreifen und Zirruswolken von 35 Mio. t CO₂ eq. bis knapp 460 Mio. t CO₂ eq. Unter Berücksichtigung realistischer, aber vorsichtiger Annahmen beläuft sich das Potenzial auf gut 200 Mio. t CO₂ eq. (IPCC-Durchschnitt).

Alternativ kann das Vermeidungspotenzial auch auf Basis des Strahlungsantriebs ermittelt werden (Tabelle 35). Die Umrechnung des Strahlungsantriebs von mW/m² in CO₂ eq. erfolgt mittels Strahlungsantrieb der CO₂-Emissionen des gesamten Luftverkehrs.

Durch die im TRADEOFF-Projekt skizzierte Flugroutenoptimierung erhöht sich aufgrund des erhöhten Treibstoffverbrauchs die Klimawirksamkeit des Luftverkehrs um bis

⁷⁷ Dabei wurde ein durchschnittlicher Emissionsfaktor von 22 kg CO₂/ km sowie ein Treibstoffmehrverbrauch von 5,6% bei Reduzierung der Reiseflughöhe um 3 Levels unterstellt.

zu 0,0001 W/m² bzw. 3,1 Mio. t CO₂ eq. (bezogen auf die Werte von 1992). Gleichzeitig aber könnten hierdurch 44,5% der Klimawirksamkeit von Kondensstreifen (und Zirruswolken) vermieden werden. Es ergibt sich insgesamt ein Vermeidungspotenzial von 0,0014 W/m² für Kondensstreifen und von bis zu 0,018 W/m² für Zirruswolken. Dies entspricht einem Vermeidungspotenzial von rund 41 Mio. t CO₂ eq. für Kondensstreifen und von bis zu 470 Mio. t CO₂ eq. für Zirruswolken bzw. insgesamt einem Vermeidungspotenzial zwischen 40 und 510 Mio. t CO₂ eq.

Tabelle 35: Bestimmung des Vermeidungspotenzials auf Basis des Strahlungsantriebs

	Strahlungsantrieb W/m ²	CO ₂ -Äquivalente Mio. t CO ₂ eq.
Klimawirksamkeit		
CO ₂ -Emissionen (gesamt)	0,0180	506
CO ₂ -Emissionen (10% der Flugstrecke)	0,0018	51
H ₂ O-Emissionen (gesamt)	0,0015	42
H ₂ O-Emissionen (10% der Flugstrecke)	0,0002	4
Erhöhte Emissionen durch Flugroutenoptimierung	0,0001	3
Kondensstreifen	0,0035	98
Zirruswolken	0,0000 bis 0,0375	0 bis 1.054
Gesamter Luftverkehr	0,0320 bis 0,1070	899 bis 3.007
Vermeidungspotenzial	0,0014 bis 0,0181	41 bis 510
Kondensstreifen (unter Berücksichtigung der erhöhten Emissionen durch Flugroutenoptimierung)	0,0014	41
Zirruswolken	0,0000 bis 0,0167	0 bis 469

Quelle: Eigene Berechnungen

Unter der Annahme, dass der Luftverkehr keine Zirruswolken verursacht bzw. diese nicht klimawirksam sind, entspricht das Vermeidungspotenzial von Kondensstreifen ca. 4,5% der Klimawirksamkeit des Luftverkehrs. Wenn jedoch die Zirruswolken bei der Klimawirksamkeit des Luftverkehrs zu berücksichtigen sind und die Hälfte ihrer Klimawirksamkeit ebenso wie Kondensstreifen zu 44,5% durch die beschriebene Flugroutenoptimierung verhindert werden können, dann können auf diese Weise die Klimawirksamkeit des Luftverkehrs um bis zu 17% reduziert werden.

Die Ergebnisse der beiden oben dargestellten Berechnungsverfahren liegen in der gleichen Größenordnung: Das Vermeidungspotenzial von Kondensstreifen lag demnach im Jahr 1992 zwischen 35 und 40 Mio. t CO₂ eq. Dieses Potenzial kann durch Änderung der Reiseflughöhe um drei Fluglevels realisiert werden, ohne dass die Zahl der geflogenen Kilometer dadurch zunimmt. Wenn mit dieser Strategie auch die Klimawirksamkeit von Zirruswolken um 44,5% reduziert werden kann und diese eine vergleichbare optische Dichte aufweisen wie Kondensstreifen, könnte hierdurch ein zusätzliches – unter Umständen deutlich größeres – Potenzial in der Größenordnung von bis zu 470 Mio. t CO₂ eq. erschlossen werden.

Das Vermeidungspotenzial könnte tatsächlich sogar noch größer sein, wenn die Klimawirksamkeit des Luftverkehrs durch Absenkung der Reiseflughöhe um vier oder fünf Fluglevels noch weiter reduziert werden kann. Die spezifischen Vermeidungskosten fielen dann zwar etwas höher aus, da der zusätzliche Treibstoffbedarf deutlich ansteigt. Sie dürften aber dennoch niedriger liegen als die spezifischen Vermeidungskosten vieler anderer Maßnahmen zur Treibhausgasminderung im Luftverkehr.

Nach den beiden beschriebenen Methoden kann auch das zukünftige Vermeidungspotenzial von Kondensstreifen und Zirruswolken prognostiziert werden (Tabelle 36). Dabei wird unterstellt, dass auch zukünftig auf 10% der Flugkilometer Kondensstreifen entstehen.

Tabelle 36: Vermeidungspotenzial von Kondensstreifen und Zirruswolken

		1992		2010		2020	
		min.	max.	min.	max.	min.	max.
Vermeidungspotenzial auf Grundlage der Verkehrsleistung							
Verkehrsleistung	Mrd. km	20,7		44,5		65,0	
Vermeidungspotenzial	Mio. t CO ₂ eq.	37	459	89	1.205	142	1.974
Vermeidungspotenzial auf Grundlage des Strahlungsanteils							
Kondensstreifen	W/m ²	0,001	0,001	0,003	0,003	0,004	0,004
Zirruswolken	W/m ²	0,000	0,017	0,000	0,038	0,000	0,050
Vermeidungspotenzial	Mio. t CO ₂ eq.	41	510	79	1.107	94	1.352
Kondensstreifen	Mio. t CO ₂ eq.	41	41	79	79	94	94
Zirruswolken	Mio. t CO ₂ eq.	0	469	0	1.028	0	1.258

Quelle: Eigene Berechnung

Die Abschätzungen zeigen, dass das Vermeidungspotenzial von Kondensstreifen und Zirruswolken zukünftig deutlich größer ausfällt: Im Jahr 2010 könnten durch die Vermeidung von Kondensstreifen die Treibhauswirkungen des Luftverkehrs um ca. 80 und im Jahr 2020 um gut 90 Mio. t CO₂ eq. reduziert werden. Bezieht man allerdings Zirruswolken mit 50% ihres potenziellen Wirkungsbeitrages ein, so fällt das Potenzial um Größenordnungen höher aus und liegt im Jahr 2010 bei mindestens 1.100 und im Jahr 2020 bei mindestens 1.350 Mio. t CO₂ eq. Die Betrachtungen zeigen, dass durch Flugroutenoptimierung kurz- und mittelfristig eine beachtliches Potenzial an Treibhausgas-minderungen im Luftverkehr erschlossen werden kann.

6.2 Kommunikations-, Navigations- und Überwachungssysteme

Durch die Einführung neuer Kommunikations-, Navigations- und Überwachungs- sowie Luftverkehrsmanagementsysteme (CNS/ATM⁷⁸) könnte die Routenführung insbeson-

⁷⁸ Communication, Navigation, Surveillance and Air Traffic Management Systeme.

dere im Hinblick auf Flughöhe und -geschwindigkeit optimiert und Verspätungen und Staus im Luftraum reduziert werden (ICAO 2002). Nach CAEP könnte durch die geplanten Änderungen der CNS/ATM-Systeme, die neue digitale Technologien, stärkere Automatisierung und einen Ausbau der Satellitennavigation umfassen, in den USA und in Europa der Treibstoffverbrauch bis zum Jahr 2015 um 5% gegenüber der Referenzentwicklung reduziert werden. Das IPCC (1999) quantifiziert das mögliche Treibstoffeinsparpotenzial in diesem Bereich sogar auf 6 bis 12%, nimmt aber an, dass dieses Potenzial nur über einen längeren Zeitraum erschlossen werden kann.

Diese Abschätzungen gehen bisher davon aus, dass durch die Einführung neuer CNS/ATM-Systeme der Treibstoffverbrauch reduziert werden kann. Wenn allerdings durch die Treibstoffoptimierung die Flughöhe so gewählt wird, dass Kondensstreifen (und Zirruswolken) entstehen können, kann dies dazu führen, dass die Klimawirksamkeit des Fluges nicht sinkt, sondern steigt. Zukünftig ist es deshalb wichtig, die Anreize für diese neuen CNS/ATM-Systeme durch die Einführung von Emissionshandel oder durch andere Instrumente so zu setzen, dass die Flüge nicht unter Treibstoff- sondern unter Klimagesichtspunkten optimiert werden. Grundsätzlich sollten die neuen CNS/ATM-Systeme deshalb so ausgelegt werden, dass sie die Routen auch unter solchen Zielstellungen optimieren können.

Im Rahmen der Analysen mit dem AERO-Modellsystem (AERO 2002, Abschnitt 5.4), wurde die Reduzierung von Verspätungen und Staus im Luftraum durch ein verbessertes Air-Traffic-Management-System modelliert. Unter der Annahme, dass das verbesserte Managementsystem ohne zusätzliche Kosten für die Fluggesellschaften eingeführt werden kann, könnten im Jahr 2010 bis zu 9,5% des Treibstoffs eingespart werden. Daraus lässt sich ein Vermeidungspotenzial von 30 bis 130 Mio. t CO₂ eq. ableiten.

6.3 Flight Management

Stratus Consulting (2002) fassen unter dem Stichwort Flight Management verschiedene Strategien zusammen, die zu einer Reduzierung von Emissionen beitragen können. Dazu zählen so unterschiedliche Maßnahmen wie Reduzierung des Flugzeuggewichts z.B. durch verringerten On-board-Service (weniger Besatzung, reduzierte Verpflegung etc.) oder geringere Betankung, Vermeidung von Leerflügen durch verbessertes Flottenmanagement sowie die Reduzierung der Fluggeschwindigkeit.⁷⁹

Insgesamt schätzt Stratus Consulting (2002), dass durch Flight Management im weiteren Sinne der Treibstoffverbrauch um ca. 5% reduziert werden kann. Die CO₂-Emissionen könnten dabei ebenfalls um 5% reduziert werden. Die NO_x-Emissionen könnten dabei gleichzeitig um ca. 9,5% verringert werden. Für 2010 kann daraus ein Vermeidungspotenzial von ca. 30 - 50 Mio. t CO₂ eq. abgeleitet werden.

⁷⁹ Gemäß CE (2002c) liegen die CO₂-Emissionen bei der emissionsoptimierten Geschwindigkeit um 15 bis 25% niedriger als bei der Geschwindigkeit mit den höchsten Emissionen.

6.4 Bessere Auslastung

Grundsätzlich gilt, dass die Emission pro Personenkilometer um so geringer ist, je höher die Flugzeuge ausgelastet sind. Insofern könnten die Treibhausgasemissionen des Luftverkehrs durch eine Erhöhung der Auslastung ebenfalls reduziert werden. Denkbar wäre etwa, dass durch Ausgestaltung des Tarfsystems die Nachfrage von gering ausgelasteten Flügen auf solche Flüge gelenkt wird, die zwar bereits gut ausgelastet sind, aber dennoch über hinreichend freie Sitzplatzkapazitäten verfügen. Substanzielle Emissionsminderungen könnten aber erst dann erzielt werden, wenn es dadurch gelänge, gering ausgelastete Flüge vollständig zu streichen.

Eine solche Strategie der Luftfahrtgesellschaften wäre allerdings mit Komforteinschränkungen für die Fluggäste verbunden, da sie aufgrund des ausgedünnten Flugplans weniger Flexibilität in der Reisegestaltung hätten und da ein stark ausgelasteter Flug tendenziell weniger komfortabel ist als ein normal ausgelasteter Flug. Darüber hinaus dürfte die Optimierung des Flugplans bereits heute zu den zentralen Steuerungsinstrumenten der Fluggesellschaften gehören, da hierdurch sowohl das Leistungsangebot als auch die Kostenseite erheblich beeinflusst wird. Insofern dürfte der Beitrag zur Vermeidung von Treibhausgasemissionen durch eine solche Strategie eher gering ausfallen.

6.5 Instandhaltung

Grundsätzlich dürften Flugzeuge wegen des Unfallrisikos zwar zu den am besten gewarteten Maschinen überhaupt gehören. Aber unter ökologischen Gesichtspunkten könnte das Wartungsniveau nach Ansicht der ICAO (2002) jedoch noch optimiert werden. Das gilt sowohl für die Wartung des Flugzeugs als auch für die Wartung der Turbinen. Stimmt beispielsweise die Justierung der Türen nicht mehr hundertprozentig, so dass sie um einige mm hervorragen, kann dies erhebliche Verwirbelungen auslösen, die den Treibstoffverbrauch erhöhen. Durch eine Rejustierung, die etwa eine Stunde in Anspruch nimmt, könnten hier pro Jahr und Flugzeug rund 500 Liter Treibstoff eingespart werden (ICAO 2002).

Bei den Turbinen ist der Anstieg des spezifischen Treibstoffverbrauchs vor allem auf eine durch Erosion bedingte Veränderung der Schaufelform und der Oberflächengüte zurückzuführen. Die Erhöhung des spezifischen Treibstoffverbrauchs um 1% führt im Mittel zu einer Erhöhung der Treibstoffkosten von 10 US\$/Betriebsstunde (ICAO 2002). Darüber hinaus wird die Performance einer Turbine vor allem durch den Gasdurchfluss determiniert. Hier kommt es immer wieder zu performanceverschlechternden Verschmutzungen und Ablagerungen, die z.T. durch einfache Waschvorgänge beseitigt werden können, bei denen die Turbine nicht ausgebaut werden muss.

Durch sorgfältige Wartung kann also vermieden werden, dass der Treibstoffverbrauch ansteigt. Oft können hier mit geringem Zeitaufwand beträchtliche Treibstoffeinsparungen erzielt werden (ICAO 2002).

6.6 Optimierung des Triebwerkes unter Klimagesichtpunkten

Die Klimaoptimierung von Triebwerken zielt sowohl auf die Minimierung des Treibstoffverbrauchs und damit von CO₂-Emissionen, als auch die Verringerung der Stickoxid-Emissionen ab.

Die Verbesserung der Treibstoffeffizienz wurde in der Vergangenheit durch die Entwicklung und den Einsatz moderner Triebwerke erreicht, die mit höheren Temperaturen und höherem Druck arbeiten. Unter diesen Bedingungen wird jedoch die Bildung von Stickoxiden begünstigt. Eine Stabilisierung oder Minderung des Stickoxidausstoßes ist daher nur durch alternative, NO_x-senkende Brennkammerkonzepte zu erreichen (Rand Europe 2002).

Aufgrund der dominierenden Bedeutung des Kraftstoffverbrauchs für die Wirtschaftlichkeit der Triebwerke bestehen bei der derzeitigen Betriebskostenstruktur von Flugzeugen allerdings nur geringe Anreize zur Förderung NO_x-mindernder Technologien. Vor dem Hintergrund des Trade-offs zwischen CO₂ und NO_x hat Rand Europe (2002) ein Konzept für Emissionsgrenzwerte entwickelt, bei denen die Klimawirksamkeit von CO₂ und NO_x gemeinsam berücksichtigt wird. Voraussetzung für dieses – allenfalls langfristig umsetzbare – Konzept ist, dass Klimawirksamkeit von CO₂ und NO_x von allen Beteiligten einvernehmlich festgelegt wird.

Rand Europe (2002) hat darüber hinaus zwei kurzfristige technologieorientierte Strategien für NO_x-Emissionsgrenzwerte ausgearbeitet. Der konservative Ansatz beinhaltet eine Verschärfung des CAEP/4-Grenzwertes um 9 – 28%, der progressive sogar eine Verschärfung um 30 – 45%. Durch die Erschließung der technologischen Minderungspotenziale könnten die NO_x-Emissionen des weltweiten zivilen Luftverkehrs im Jahr 2020 um 17% unter der prognostizierten Referenzemissionen liegen. Da jedoch das Wachstum des Luftverkehrs erheblich höher liegt, wird es auch bei Erschließung dieser Potenziale zu einem absoluten Anstieg der NO_x-Emissionen kommen (Rand Europe 2002).

Bei den Simulationen mit dem AERO-Modellsystem (AERO 2002) wurde untersucht, wie sich eine jährliche Reduktion des NO_x-Emissionsfaktors sowie eine jährliche Steigerung der Treibstoffeffizienz um jeweils 1% auf das Emissionsniveau auswirkt. Aus den Modellergebnissen lässt sich in Abhängigkeit von den Kosten dieser Maßnahmen für die Fluggesellschaften ein Einsparpotenzial für Triebwerksoptimierung von 3 - 20 Mio. t CO₂ eq. im Jahr 2010 und von 35 - 130 Mio. t CO₂ eq. für das Jahr 2020 ableiten.

Das Ersetzen von alten durch neue, effizientere Triebwerke (Re-engining) bietet sich als Vermeidungsoption vor allem für Flugzeuge an, die weniger als 20 Jahre alt sind. Denn bei einer Diskontrate von 7% amortisiert sich der Einbau eines neuen Triebwerkes erst nach ca. 20 Jahren. Die jährlichen CO₂-Einsparungen hängen vom Alter des Flugzeuges bzw. des ersetzten Triebwerkes ab. Stratus Consulting (2002) schätzt, dass durchschnittlich etwa 0,5% der CO₂-Emissionen für jedes Betriebsjahr des zu ersetzenden Triebwerks eingespart werden können. Bezogen auf ein 20 Jahre altes

Triebwerk belaufen sich die CO₂-Einsparungen daher auf rund 10%. Der Austausch der Triebwerke hat jedoch nicht nur Auswirkung auf die CO₂- sondern auch auf die NO_x-Emissionen. Stratus Consulting (2002) geht davon aus, dass durch den Austausch pro Betriebsjahr des stillgelegten Triebwerks etwa 0,725% mehr NO_x-Emissionen emittiert werden. Bezogen auf ein 20 Jahre altes Triebwerk ergibt sich damit eine Erhöhung der Stickoxidemissionen um 14,5%.

CE (2002a) untersucht die Vermeidungsoption des Triebwerksaustausches (Re-engining) an Hand von zwei Fallstudien. Sie kommen zu dem Ergebnis, dass hierdurch zwar der Beitrag des Flugverkehrs zum Klimaproblem reduziert werden könnte, allerdings nur zu sehr hohen Kosten. In wie weit der Triebwerksaustausch wirtschaftlich ist, hängt stark von den Rahmenbedingungen ab. Während beispielsweise in den 80er und 90er Jahren Re-engining aufgrund der hohen Treibstoffkosten und den steigenden Anforderungen an Lärmgrenzwerte eine häufig in Betracht gezogene Vermeidungsoption darstellte, ist sie derzeit meist nicht wirtschaftlich.

6.7 Verbesserung der Aerodynamik

Durch eine verbesserte Aerodynamik des Flugzeugs können Treibstoffverbrauch und somit auch CO₂- und NO_x-Emissionen reduziert werden. Derzeit kann die Aerodynamik von Flugzeugen beispielsweise durch den Einsatz so genannter Winglets und/oder Riblets optimiert werden.

6.7.1 Winglets

Das optimale Flügeldesign ist eine der schwierigsten Herausforderungen bei der Entwicklung neuer Flugzeuge. Die aerodynamischen Eigenschaften von Flügeln können einerseits dadurch verbessert werden, dass Flügel mit einer größeren Spannweite eingesetzt werden. Andererseits besteht die Möglichkeit, so genannte Winglets (Wingtip Devices) einzusetzen, verlängernde Anbauten an die Flügelspitzen.⁸⁰ Winglets können allerdings in der Regel nur bei älteren Flugzeugen nachgerüstet werden, da bei neueren Flugzeugtypen das Flügeldesign bereits entsprechend optimiert ist.

Die durch den Einsatz von Winglets erzielbaren Emissionsreduktionen reichen nach Berechnungen von CE (2002a) von 2% der CO₂-Emissionen und 3% der NO_x-Emissionen bei kurzen Distanzen, bis zu 6% der CO₂-Emissionen und 11% der NO_x-Emissionen bei langen Distanzen. Da die Reduktion des Treibstoffverbrauchs durch den Einsatz von Winglets bei Mittel- und Langstreckenflugzeugen größer ausfällt als bei Kurzstreckenflugzeugen, ist die Nachrüstung vor allem für Flugzeuge mit einem Maximal Zero Fuel Weight (MZFW) ab 70 t wirtschaftlich attraktiv.

⁸⁰ Herkömmliche Winglets für Boeing und Airbus Maschinen werden im steilen Winkel an den Flügelspitzen montiert. Neuere von Boeing entwickelte Winglets weisen einen sanften Bogenverlauf auf (Stratus Consulting 2002).

Tabelle 37: CO₂- und NO_x-Einsparungen durch den Anbau von Winglets

Flugdistanz [nautical miles]	CO ₂ -Einsparungen [%]	NO _x -Einsparungen [%]
< 500	1,0	1,90
< 1.000	1,5	2,85
< 1.500	2,0	3,80
< 2.500	2,5	4,75
< 3.500	3,0	5,70
< 4.500	3,5	6,65
> 4.500	4,0	7,60

Quelle: Stratus Consulting 2002

Stratus Consulting (2002) nimmt an, dass sich die Investitionskosten für Winglets in 15 Jahren amortisieren lassen. Die erzielbaren CO₂-Minderungen liegen in Abhängigkeit von der Flugdistanz zwischen 1 und 4% (Tabelle 37). Die gleichzeitig erzielbaren NO_x-Reduktionen ergeben sich vor allem aus einer Verminderung der notwendigen Triebwerksdrosselung, um die selbe Fluggeschwindigkeit zu erreichen. Sie liegen in etwa um den Faktor 1,9 höher als die erzielbaren CO₂-Einsparungen.

6.7.2 Riblets

Auch durch das Auftragen von so genannten Riblets kann die Aerodynamik von Flugzeugen verbessert werden. Riblets sind Furchen in Strömungsrichtung, die als Film mit einer Dicke von weniger als 1 mm an Stelle von Farbe an der Außenwand von Flugzeugen aufgetragen werden. Der verringerte Widerstandsbeiwert des Flugzeugs führt dazu, dass trotz des höheren Gewichts durch das aufgetragene Material⁸¹ deutliche Emissionsreduktionen realisiert werden können. Nachteilig ist jedoch die Gefahr der Verschmutzung von Riblets durch Russ und Staubpartikel. Dies kann zu einer verringerten Wirksamkeit dieser Vermeidungsoption führen.

Stratus Consulting (2002) gibt für die Anwendung dieser Technik ein maximales Alter des Flugzeuges von 30 Jahren an. Die Investitionskosten amortisieren sich nach ihren Angaben innerhalb von fünf Jahren. Die CO₂-Emissionen könnten dadurch um 1 bis 2% und die NO_x-Emissionen um 2 bis 4% reduziert werden (Tabelle 38). Dabei ist allerdings die Einschränkung der Wirksamkeit durch Verschmutzung noch nicht berücksichtigt.

⁸¹ Die Gewichtszunahme des Flugzeugs liegt in der Größenordnung von 150 - 800 kg je nach Größe bzw. Oberfläche des Flugzeugs und je nachdem ob die Riblets auf die Farbe oder an Stelle von Farbe aufgetragen werden (CE 2002c).

Tabelle 38: CO₂- und NO_x-Einsparungen durch den Einsatz von Riblets

Flugdistanz [nautical miles]	CO ₂ -Einsparungen [%]	NO _x -Einsparungen [%]
< 500	1,0	1,90
< 1.500	1,5	2,85
> 1.500	2,0	3,80

Quelle: Stratus Consulting 2002

Nach Angaben von CE (2002c) kann durch Riblets in Abhängigkeit von der Flugdistanz zwischen 0,5 und 1,5% des Treibstoffverbrauchs eingespart werden. Die Investitionskosten liegen – je nach Größe des Flugzeugs – zwischen 30.000 und 250.000 US\$. Den Berechnungen von CE zufolge ist der Einsatz von Riblets heutzutage nur wirtschaftlich für Flugzeuge mit einem MZFW von mehr als 70 t. Die Wirtschaftlichkeit von Riblets würde durch die Einführung einer emissionsabhängigen Steuer oder durch die Einführung von Emissionshandel allerdings merklich steigen.

6.7.3 Potenzial

Beide Maßnahmen zur Verbesserung der aerodynamischen Effizienz von Flugzeugen weisen ein Minderungspotenzial auf, das grundsätzlich nicht vernachlässigt werden sollte. Allerdings ist der Anbau von Winglets eine Nachbesserungsmaßnahme, die nur bei einem Teil der älteren Flugzeuge sinnvoll ist. Neuere Flugzeugmodelle werden bereits mit aerodynamisch optimiertem Flügeldesign ausgeliefert, so dass eine Nachbesserung überflüssig ist. Das Potenzial von Winglets ist deshalb zeitlich begrenzt.

Bei Riblets ist das Vermeidungspotenzial hingegen zeitlich nicht begrenzt. Allerdings haben sie sich aufgrund der noch ungelösten Probleme mit der Verschmutzung auf dem Markt noch nicht durchgesetzt (CE 2002c, Airbus 2003). Das Vermeidungspotenzial beider Maßnahmen zusammen wird derzeit auf maximal 10 Mio. t CO₂ eq. pro Jahr geschätzt.

6.8 Frühzeitige Stilllegung von Flugzeugen

Neue Flugzeuge sind effizienter als alte Flugzeuge. Sie verbrauchen weniger Treibstoff und emittieren weniger Treibhausgase. Durch den Austausch alter Flugzeuge durch neue, effizientere Modelle (Early Retirement) könnten der Treibstoffverbrauch und damit auch die Treibhausgasemissionen reduziert werden.

Stratus Consulting (2002) schätzt, dass im Hinblick auf die Vermeidung von CO₂ 60% der Effizienzsteigerungen bei Flugzeugen auf die Verbesserung an den Turbinen zurückzuführen sind, während der Rest der Effizienzsteigerungen durch Verbesserungen am Flugzeug selbst oder beim Betrieb erzielt werden können. Für die Vergangenheit kann von einer durchschnittlichen Verbesserung der Treibstoffeffizienz in der Größenordnung von 1% ausgegangen werden. Wird beispielsweise ein 30 Jahre altes Flug-

zeug 3 Jahre früher als ursprünglich geplant durch ein neues ersetzt, so könnten dadurch 3 Jahre lang 30% des Treibstoffs eingespart werden. Die Einsparungen bei den NO_x-Emissionen fallen etwas niedriger aus, weil die Energieeffizienz neuer Turbinen meistens nur zu Lasten des Emissionsfaktors für NO_x gesteigert werden kann. Den Abschätzungen von Stratus Consulting (2002) zufolge könnten 0,02% der NO_x-Emissionen pro Betriebsjahr des stillgelegten Flugzeugs eingespart werden, d.h. bei Stilllegung eines 30 Jahre alten Flugzeugs könnten die NO_x-Emissionen um 0,6% reduziert werden.

Bei der hochkomplexen Entscheidung über die vorgezogene Stilllegung von Flugzeugen fließen eine Vielzahl von Faktoren ein, wie z.B. erwartete Treibstoffpreise, Marktperspektive, Liquidität der Fluggesellschaft, erwartete Kapitalverzinsung. Ökologische Kriterien werden dabei aber bisher nicht berücksichtigt. CE (2000c) schätzt, dass bei Einführung einer Treibstoffsteuer oder von Emissionshandel ab einem Zertifikatspreis in der Größenordnung von 10 bis 50 €/t CO₂ eq. der Austausch alter Flugzeuge um bis zu zwei Jahren vorgezogen würde.

Die Auswirkungen einer frühzeitigen Stilllegung von Flugzeugen wurden ebenfalls mit dem AERO-Modellsystem (AERO 2002, Abschnitt 5.4) simuliert. Dabei wurde eine Stilllegung nach 20, 25 und 30 Jahren betrachtet. Weiterhin wurde differenziert, ob die Kosten der frühzeitigen Stilllegung durch die einzelnen Staaten oder die Fluggesellschaften getragen werden. Je nachdem welche Annahmen man unterstellt, ergibt sich daraus ein Vermeidungspotenzial von 45 - 160 Mio. t CO₂ eq. im Jahr 2010 sowie von 50 - 200 Mio. t CO₂ eq. im Jahr 2020. Die Realisierung des Vermeidungspotenzials ist jedoch mit relativ hohen Kosten verbunden.

6.9 Fazit

Die Analyse der verschiedenen Optionen zur Minderung der Treibhauswirkung des Luftverkehrs hat gezeigt, dass es viele verschiedene Maßnahmen gibt, mit denen die Klimawirksamkeit reduziert werden kann. Allerdings unterscheiden sich die Optionen sowohl im Hinblick auf Potenzial und spezifische Kosten als auch im Hinblick auf ihren zeitlichen Umsetzungshorizont. Einige Maßnahmen können kurz- bis mittelfristig realisiert werden, andere dagegen erfordern längere Umsetzungszeiträume. Tabelle 39 (Seite 150) zeigt eine Übersicht der verschiedenen Aspekte der einzelnen Minderungsoptionen.

Durch Maßnahmen im Luftverkehr könnten also bis 2010 zwischen 200 und 1.470 Mio. t CO₂ eq. und bis 2020 zwischen 390 und 1.900 Mio. t CO₂ eq. eingespart werden. Die jeweiligen Obergrenzen der Potenziale sind jedoch mit Unsicherheiten verbunden, da ca. zwei Drittel auf die Vermeidung von Kondensstreifen und Zirruswolken zurückzuführen sind. Das Minderungspotenzial an CO₂-Emissionen beläuft sich lediglich auf 90 bis 235 Mio. t im Jahr 2010 und 90 bis 325 Mio. t im Jahr 2020.

Gut ein Drittel des CO₂-Minderungspotenzials könnte durch die frühzeitige Stilllegung von Flugzeugen erschlossen werden. Allerdings ist diese Maßnahme vergleichsweise

kostenintensiv. Sie wird grundsätzlich erst attraktiv, wenn die Preise für Emissionsrechte in der Größenordnung zwischen 10 und 50 US\$/t CO₂ eq. liegen.

Tabelle 39: Vermeidungspotenziale im Überblick

Vermeidungsoptionen	Reduktion der Klimawirksamkeit von	Zeithorizont	Potenzial in Mio. t		Spez. VMK / Bemerkungen
			CO ₂ eq.	t CO ₂	
Flugroutenoptimierung	KS, ZW, NO _x	1992	37- 470		< 3 US\$/t CO ₂ eq.
		2010	80 - 1.100		< 3 US\$/t CO ₂ eq.
		2020	90 - 1.350		< 3 US\$/t CO ₂ eq.
CNS/ATM	CO ₂ , NO _x , H ₂ O	2010	30 - 130	20 - 80	
Flight Management	CO ₂ , NO _x , H ₂ O	2010	30 - 50	30 - 40	
Bessere Auslastung	alle		gering	gering	Trade-off zu Komfort und Service
Instandhaltung	CO ₂ , NO _x , H ₂ O		gering - mittel	gering - mittel	kostengünstig
Optimierung des Triebwerks					
Verstärkte NO _x -Reduktion	CO ₂ , NO _x , H ₂ O	2010	3 - 20	0 - 11	Trade-off zwischen NO _x und CO ₂
		2020	35 - 150	0 - 80	Trade-off zwischen NO _x und CO ₂
Re-engining	CO ₂ , NO _x , H ₂ O	mittel- bis langfristig	mittel - groß		kostenintensiv
Verbesserung der Aerodynamik	CO ₂ , NO _x , H ₂ O	kurzfristig	< 10	< 10	
Frühzeitige Stilllegung	CO ₂ , NO _x , H ₂ O	2010	45 - 160	30 - 95	kostenintensiv
		2020	50 - 200	30 - 115	kostenintensiv

KS: Kondensstreifen, ZW: Zirruswolken

Quelle: Eigene Zusammenstellung

Wird allerdings die gesamte Klimawirksamkeit des Luftverkehrs erfasst, so könnten zwischen gut einem und gut zwei Dritteln des Minderungspotenzials durch die Vermeidung von Kondensstreifen und Zirruswolken erschlossen werden. Im Unterschied zur frühzeitigen Stilllegung von Flugzeugen fallen bei dieser Maßnahme die Kosten jedoch relativ niedrig aus. Selbst unter ungünstigen Annahmen dürften die Kosten für die Vermeidung von Kondensstreifen kaum 3 US\$/t CO₂ eq. übersteigen. Sie liegen damit unter den Preisen, die derzeit für Minderungskredite aus CDM-Projekten erwartet werden (3 - 5 US\$/t CO₂ eq.).

Allerdings wurden bei der Abschätzung der Vermeidungskosten von Kondensstreifen einige vereinfachende Annahmen unterstellt. So wurde z.B. eine Verlängerung der Flugzeit und die damit ggf. entstehenden Kosten außer Acht gelassen. Dies scheint jedoch insofern gerechtfertigt, als Modellanalysen (Abschnitt 6.1.1.1) gezeigt haben, dass sich die Flugzeit bei einer Reduzierung der Reiseflughöhe nur bei einem Teil der Flüge verlängert und bei einigen Flügen sich sogar verkürzt würden. Darüber hinaus entstehen Kondensstreifen in der Regel nicht auf der gesamten Flugstrecke, so dass eventuelle Verlängerungen der Flugzeit auch dadurch begrenzt werden können, dass nur auf den Teilstrecken die Flughöhe reduziert wird, auf denen Kondensstreifen auftreten. Letztlich kann allerdings nicht ausgeschlossen werden, dass es bei einzelnen Flügen zu erheblichen Verlängerungen der Flugzeit kommt. Im Mittel dürfte der Effekt auf die Reisezeit allerdings tatsächlich gering und somit vernachlässigbar ausfallen. Voraussetzung hierfür ist jedoch, dass die Flughöhen im Rahmen eines Free Flight

Concepts auch unter Klimagesichtspunkten optimiert und flexibel gewählt werden können.

Darüber hinaus wurde angenommen, dass die Treibhausgaswirkungen des Luftverkehrs in CO₂-Äquivalente umgewandelt werden können. Das ist unabdingbar im Rahmen eines offenen Emissionshandels, denn sonst wären die Emissionsrechte des Luftverkehrs nicht vergleichbar mit den Emissionsrechten und Minderungskrediten unter dem Kioto-Protokoll und somit auch nicht systemübergreifend handelbar. Für die Umwandlung der Treibhauswirkungen des Luftverkehrs wurde zunächst vom Strahlungsantrieb der einzelnen treibhauswirksamen Substanzen ausgegangen. Mittels des so genannten Strahlungsantriebsfaktors kann z.B. auch der Strahlungsantrieb von Kondensstreifen mit dem Strahlungsantrieb von CO₂ verglichen werden. Der Strahlungsantrieb berücksichtigt allerdings noch nicht die unterschiedliche Verweildauer der klimawirksamen Substanzen in der Atmosphäre. Allerdings haben die Analysen des IPCC (1999) für die Zeitpunkte 1992, 2015 und 2050 gezeigt, dass der Strahlungsantrieb von Kondensstreifen zu jedem der Zeitpunkte größer war als der von CO₂, obwohl bei Kondensstreifen wegen der kurzen Verweildauer nur der Strahlungsantrieb des jeweiligen Jahres, bei CO₂ jedoch der Strahlungsantrieb der seit 1950 akkumulierten Emissionen berücksichtigt wurde (Abschnitt 3.3.1). Trotz der kurzen Verweildauer können Kondensstreifen und Zirruswolken also mittels dieser Methode in CO₂-Äquivalente überführt werden.

Vernachlässigt bei den Abschätzungen wurden auch die Transaktionskosten für die Überwachung und Kontrolle der Vorgaben zur Vermeidung von Kondensstreifen (und Zirruswolken) durch die Flugsicherung, da hierfür keine Daten verfügbar sind. Allerdings dürften diese Kosten letztlich vergleichsweise niedrig ausfallen, da die für die Überwachung und Kontrolle notwendigen Daten größtenteils schon heute kontinuierlich erfasst und aufgezeichnet werden. Notwendig wären insofern vor allem neue Auswertungsroutinen dieser Daten, die sowohl den Piloten als auch der Flugsicherung zeitnah anzeigen, ob die Vorgaben eingehalten werden.

Die spezifischen Kosten der Vermeidung von Kondensstreifen von bis zu 3 US\$/t CO₂ eq. dürften trotz dieser aufgrund begrenzter Datenverfügbarkeit notwendigen Vereinfachungen die Obergrenze der Vermeidungskosten für Kondensstreifen darstellen. Dabei wurde unterstellt, dass entweder die Reiseflughöhe um 4 Fluglevel reduziert werden muss, obwohl in einigen Fällen Kondensstreifen schon durch die Reduzierung der Reiseflughöhe um ein Fluglevel vermieden werden können, oder dass der gesamte Flug 3 Fluglevel niedriger durchgeführt wird, obwohl Kondensstreifen nur auf der Hälfte der Flugstrecke auftreten. Nimmt man dagegen realistischer an, dass die Flughöhe lediglich um 3 Fluglevel reduziert werden muss und dass die Flughöhe nur auf der Distanz

reduziert wird, auf der auch Kondensstreifen entstehen, so kommt man zu spezifischen Vermeidungskosten in der Größenordnung von 2,70 US\$/t CO₂ eq.⁸²

Dabei ist die Wirkung von Zirruswolken wegen der derzeit noch bestehenden wissenschaftlichen Unsicherheiten über ihren Wirkungsbeitrag noch völlig unberücksichtigt. Nimmt man jedoch an, dass durch die Vermeidung von Kondensstreifen auch Zirruswolken vermieden werden können und dass der Wirkungsbeitrag nur bei 22% von dem liegt, was derzeit als maximaler Wirkungsbeitrag angesehen wird, so errechnen sich spezifische Vermeidungskosten in der Größenordnung von 0,50 US\$/t CO₂ eq.

Alles in allem zeigen diese Überlegungen, dass die Vermeidung von Kondensstreifen und ggf. auch Zirruswolken nach dem derzeitigen – zweifellos noch begrenzten – Wissensstand eine sehr kostengünstige Vermeidungsoption im Luftverkehr darstellt, die durchaus mit den Preisen von CDM-Minderungskrediten konkurrieren kann. Entgegen der weit verbreiteten Auffassung, dass der Luftverkehr im Rahmen eines offenen Emissionshandelssystems vermutlich ausschließlich als Käufer von Emissionsrechten und Minderungskrediten auftreten wird, zeigen diese Überlegungen, dass auch im Luftverkehr kostengünstige Minderungspotenziale erschlossen werden können – zumindest sofern die gesamte Klimawirksamkeit des Luftverkehrs berücksichtigt wird.

Wird jedoch ausschließlich CO₂ als Bemessungsgrundlage für ein Emissionshandelssystem im Luftverkehr gewählt, so sind die Vermeidungspotenziale im Luftverkehr sowohl relativ begrenzt als auch größtenteils sehr kostenintensiv. In diesem Falle dürfte der Luftverkehr überwiegend als Käufer von Emissionsrechten auftreten und nur zu relativ geringen Anteilen Minderungsleistungen selbst erbringen.

⁸² Zusätzlich wird durch die Verringerung der Reiseflughöhe – gewissermaßen als positiver Nebeneffekt dieser Vermeidungsstrategie – die kosmische Strahlenbelastung für Besatzung und Passagiere gesenkt. Dies dürfte vor allem für die Besatzungen relevant sein, da hierdurch die im Laufe ihres Berufslebens akkumulierte Strahlung deutlich gesenkt werden kann.

7. Schlussfolgerung

Nach Schätzungen des IPCC trägt der internationale Flugverkehr mit etwa 3,5% zum anthropogenen Treibhauseffekt bei. Setzt sich das Wachstum des Flugverkehrsaufkommens wie in den 90er Jahren mit 4% pro Jahr fort, so wird der Beitrag des internationalen Flugverkehrs schon im Jahr 2010 höher sein als der Beitrag Deutschlands zur globalen Erderwärmung. Dennoch wird der internationale Luftverkehr nicht von den quantifizierten Minderungszielen des Kioto-Protokoll erfasst. Die Mitgliedsstaaten werden in Art. 2.2 des Kioto-Protokolls lediglich aufgefordert, die durch Bunker Fuels verursachten Treibhausgasemissionen zu begrenzen und zu reduzieren. Vor diesem Hintergrund wird derzeit im Umweltausschuss der Internationalen Zivilluftfahrt-Organisation ICAO (Committee on Aviation Environmental Protection, CAEP) die Einführung eines Emissionshandels für den internationalen Luftverkehr diskutiert.

In der vorliegenden Studie wurden die Möglichkeiten und Ausgestaltungsoptionen eines Emissionshandelssystems im internationalen Luftverkehr ausführlich untersucht. Dabei wurde zunächst die Klimawirksamkeit der luftverkehrsbedingten Emissionen und Reaktionsprodukte näher betrachtet. Neben Kohlendioxidemissionen (CO_2) sind im Luftverkehr auch die Treibhauswirkungen von Wasserdampf, die Treibhauswirkungen der Reaktionsprodukte von Stickoxidemissionen (Ozon und Methan), die Treibhauswirkungen von Kondensstreifen und Zirruswolken sowie nachrangig die Treibhauswirkungen von Ruß- und Sulfataerosolen zu berücksichtigen. Die Entstehungsmechanismen und Wirkungen der treibhauswirksamen Substanzen unterscheiden sich teilweise erheblich von denen bodennaher Emissionen. Für einige der Substanzen sind die Entstehungsmechanismen und Wirkungen bisher wissenschaftlich noch nicht abschließend geklärt.

Wissenschaftlicher Konsens ist jedoch, dass die Klimawirksamkeit des Luftverkehrs nur zum einem Teil auf der Wirkung der CO_2 -Emissionen beruht. Je nachdem, wie die Klimawirksamkeit von Zirruswolken bewertet wird, lag der Anteil von CO_2 an der Klimawirksamkeit im Jahr 1992 zwischen 21 und 58%. Also selbst wenn die Zirruswolken, deren Wirkungsbeitrag derzeit noch sehr umstritten ist, nicht berücksichtigt werden, werden immerhin zwei Fünftel der luftverkehrsbedingten Treibhauswirkungen nicht durch CO_2 verursacht.

Im Hinblick auf die Ausgestaltung eines Emissionshandelssystems ist dabei vor allem von Bedeutung, dass Trade-offs zwischen einzelnen treibhauswirksamen Substanzen bestehen. Werden z.B. Triebwerke ausschließlich im Hinblick auf CO_2 optimiert, so kann dies zu einem Anstieg der NO_x -Emissionen des Triebwerks und in der Konsequenz zu einer verstärkten Ozonbildung führen. Ferner können Treibstoffverbrauch und CO_2 -Emissionen durch eine weitere Erhöhung des Fluglevels reduziert werden, wodurch aber zusätzliche Kondensstreifen und Zirruswolken entstehen können. Die Treibhauswirkung des Luftverkehrs kann aber nur dann reduziert werden, wenn unter Berücksichtigung dieser Trade-offs der Nettoeffekt eindeutig negativ ist. Wird lediglich CO_2 als Bemessungsgrundlage für das Emissionshandelssystem gewählt, so kann das

in der Summe zu einem Anstieg der Treibhauswirkung führen. Deshalb muss ein ausschließlich auf CO₂ basierendes Emissionshandelssystem in jedem Fall durch andere Maßnahmen wie z. B. hinreichend restriktive Emissionsgrenzwerte für NO_x-Emissionen oder eine Beschränkung der Reiseflughöhe auf den Streckenabschnitten, auf denen Kondensstreifen und Zirruswolken entstehen können, flankiert werden.

Bei einer Bemessungsgrundlage, durch die die gesamten Treibhauswirkungen des Luftverkehrs erfasst werden, würden dagegen die Anreize zur Verringerung der Treibhauswirkungen richtig gesetzt, so dass auf flankierende Maßnahmen verzichtet werden kann. Auch wenn die Transaktionskosten in diesem Falle höher ausfallen als bei einem rein auf CO₂ basierten Emissionshandelssystem, dürften die zusätzlichen Kosten insgesamt relativ gering ausfallen, da viele der hierfür notwendigen Daten bereits heute erfasst und dokumentiert werden. Insofern ist die Entwicklung eines Emissionshandelssystems auf der Grundlage einer umfassenden Bemessungsgrundlage praktikabel und empfehlenswert.

Neben der Bemessungsgrundlage stellt sich die Frage, ob das Emissionshandelssystem isoliert für den Luftverkehr eingeführt werden soll (geschlossen), oder ob Handel mit anderen Sektoren zugelassen wird (offen). Ein offenes Handelssystem muss allerdings für den Flugverkehr so ausgestaltet sein, dass die Handelbarkeit der Emissionsrechte mit dem Emissionshandel unter dem Kioto-Protokoll gewährleistet ist, da der Kioto-Handel der einzige Marktplatz, der hierfür in Frage kommt.

Ein geschlossenes System ist einfacher zu verwalten, hat jedoch den Nachteil, dass lediglich die im Luftverkehr existierenden Minderungspotenziale erschlossen werden können. Sind die kostengünstigen Minderungspotenziale ausgeschöpft, können weitere Minderungen der Treibhauswirkung des Luftverkehrs nur durch eine Reduzierung der Flugleistung erzielt werden. Das Minderungsziel kann in einem geschlossenen System deshalb nicht so ambitioniert gewählt werden wie in einem offenen Emissionshandelssystem.

Bei einem offenen Emissionshandel besteht hingegen die Herausforderung darin, sicher zu stellen, dass die Klimawirkungen, die den Emissionsrechten gegenüberstehen, auch vergleichbar sind. Sofern lediglich CO₂ als Bemessungsgrundlage gewählt wird, wäre diese Vergleichbarkeit allenfalls formal gegeben. Doch wenn eine Tonne CO₂ im Luftverkehr emittiert wird, geht dies immer mit einer deutlich höheren Klimawirksamkeit einher, als wenn eine Tonne CO₂ beispielsweise im Straßenverkehr oder einer stationären Emissionsquelle emittiert wird. Eine direkte Vergleichbarkeit der Klimawirkung pro emittierter Menge an CO₂-Emissionen ist also auch in einem ausschließliche auf CO₂ basierten offenen Emissionshandelssystem nicht gegeben. Vor diesem Hintergrund sollte in einem solchen System immer eine Bemessungsgrundlage gewählt werden, die die gesamte Treibhauswirksamkeit des Luftverkehrs abbildet, obwohl eine solche Bemessungsgrundlage administrativ schwieriger zu handhaben ist und zudem die Entwicklung eines Gateway-Mechanismus erfordert, mit dem die gesamten klimawirksamen Substanzen des Luftverkehrs mit den Treibhauswirkungen von CO₂ vergleichbar gemacht werden können.

Die Festlegung der nachweispflichtigen Akteure bestimmt in hohem Maße die Effektivität, die Implementierbarkeit und die Transaktionskosten des Handelssystems. Obwohl grundsätzlich verschiedene Akteure in Frage kommen (Treibstoffhändler, Flughäfen, Hersteller etc.) zeigt die Analyse, dass die Fluggesellschaften als nachweisverpflichtete Akteure am ehesten in Frage kommen. Denn die Zahl der Luftfahrtgesellschaften ist einerseits hinreichend klein, so dass der Kontrollaufwand begrenzt bleibt. Andererseits ist die Zahl der Akteure so groß, dass Wettbewerb am Zertifikatsmarkt sichergestellt ist und es kaum zur Herausbildung von Marktmacht oder Kartellen kommen kann. Darüber hinaus haben die Fluggesellschaften unmittelbar Einfluss auf technische und operative Minderungsoptionen und können deshalb direkt auf die durch einen Emissionshandel neu etablierten Anreizmechanismen reagieren.

Prinzipiell könnte ein Emissionshandelssystem im Luftverkehr als Cap & Trade- oder als Baseline & Credit-System ausgestaltet werden. Beim Cap & Trade-System ist die Menge der Emissionsrechte absolut begrenzt und somit der Beitrag des Luftverkehrs zur Minderung des Treibhauseffekts klar definiert. Bei steigender Verkehrsleistung im Luftverkehr würde allerdings das relative Minderungs- bzw. Stabilisierungsziel – insbesondere im Falle eines geschlossenen Emissionshandelssystems – allerdings automatisch ambitionierter. Die Preise für Emissionsrechte würden ebenfalls steigen. Bei einem Baseline & Credit-System ist dies nicht der Fall. Denkbar wäre etwa, dass ein spezifischer Emissionsfaktor pro Personenkilometer als Baseline festgelegt wird. Fluggesellschaften, deren durchschnittlicher Emissionsfaktor geringer ist als die Baseline können dann entsprechend Minderungskredite verkaufen, während Fluggesellschaften mit höheren Emissionsfaktoren solche Kredite erwerben müssten. Da das Minderungsziel proportional zur Verkehrsleistung ist, bleibt es – relativ betrachtet – sowohl bei wachsender wie auch bei rückläufiger Verkehrsleistung konstant. Problematisch aus ökologischer Perspektive ist allerdings, dass bei einem solchen System der Beitrag des Luftverkehrs zur Minderung des Treibhauseffekts nicht exakt bestimmt werden.

Wie die Erfahrungen des britischen Emissionshandelssystems gezeigt haben, ist die Verknüpfung eines Cap & Trade- mit einem Baseline & Credit-System administrativ sehr aufwändig. Da der Emissionshandel unter dem Kioto-Protokoll als Cap & Trade-System ausgestaltet ist, kommt die Etablierung eines Baseline & Credit-Systems für den Luftverkehr deshalb nur für den Fall eines geschlossenen Emissionshandelssystems in Frage. Hinzu kommt, dass bei einem offenen Emissionshandelssystem jederzeit die Möglichkeit besteht, kostengünstige Emissionsrechte aus anderen Sektoren zu erwerben. Selbst bei einer steigenden Nachfrage im Luftverkehr würden die Preise für Emissionsrechte im Luftverkehr also nicht über das Preisniveau der unter dem Kioto-Protokoll gehandelten Emissionsrechte steigen. Bei einem offenen Emissionshandelssystem entfällt somit die Legitimation für die Etablierung eines Baseline & Credit-Systems.

Ähnlich wie beim Kioto-Protokoll ist auch beim Emissionshandel im Luftverkehr davon auszugehen, dass nicht alle Staaten von Anfang an am Emissionshandelssystem teilnehmen. Denkbar wäre, dass der Emissionshandel im Luftverkehr zunächst in den

Staaten eingeführt wird, die auch das Kioto-Protokoll ratifiziert haben. Grundsätzlich dürfte es aber auch kein Problem sein, wenn die Gruppe der am Emissionshandel im Luftverkehr teilnehmenden Staaten nicht absolut kongruent mit der Gruppe der am Kioto-Handel teilnehmenden Staaten ist.

Im Rahmen der Klimaverhandlungen wurden verschiedene Optionen zur Zuordnung der Emissionen des internationalen Flugverkehrs auf die Nationalstaaten identifiziert. Die Vor- und Nachteile der verschiedenen Optionen wurden ausführlich diskutiert. Die Analyse hat gezeigt, dass eine Zuordnung der Emissionen nach Abflugort und Ziel des Fluges für ein Emissionshandelssystem am besten geeignet ist, da sie am ehesten mit dem Territorialprinzip des Kioto-Protokolls vergleichbar ist und zudem nicht-intendierte Ausweichstrategien begrenzt.

In jedem begrenzten Emissionshandelssystem stellt sich jedoch immer die Frage, wie mit Aktivitäten umgegangen werden soll, die über die Grenzen des Systems hinaus gehen bzw. mit Aktivitäten außerhalb des Systems im Wettbewerb stehen. Unumstritten ist wohl, dass Flüge zwischen zwei teilnehmenden Staaten vollständig erfasst werden, und zwar in der Weise, dass dem Start- und dem Zielland jeweils die Hälfte der Emissionen angerechnet werden. Flüge zwischen zwei nicht-teilnehmenden Staaten werden dementsprechend nicht erfasst. Bei Flügen zwischen einem teilnehmenden und einem nicht-teilnehmenden Staat sollten die Treibhausgasemissionen beim teilnehmenden Staat zumindest zur Hälfte erfasst werden. Dabei sollte die Erfassung einer Flugrelation jeweils unabhängig davon sein, ob eine Fluggesellschaft in einem teilnehmenden oder einem nicht-teilnehmenden Staat beheimatet ist. Wird beispielsweise ein Flug zwischen zwei teilnehmenden Staaten von einer Fluggesellschaft betrieben, die in einem nicht-teilnehmenden Staat beheimatet ist, so würde dieser Flug auch vollständig erfasst. Dementsprechend müsste diese Fluggesellschaft im Falle einer freien Vergabe von Emissionsrechten ebenfalls mit Emissionsrechten ausgestattet werden. Das Heimatland der Fluggesellschaften wäre im Rahmen des Emissionshandelssystems also letztlich unerheblich. Wäre dem nicht so, so käme es zu drastischen Wettbewerbsnachteilen für Fluggesellschaften, die in teilnehmenden Staaten beheimatet sind und damit zu einem starken Anreiz, den Sitz der Fluggesellschaft in nicht-teilnehmende Staaten zu verlegen. Auf diese Weise könnten die Fluggesellschaften ihren Verpflichtungen kurzfristig ausweichen, ohne dass die Klimawirksamkeit des Luftverkehrs reduziert wird.

Abgesehen von Aspekten der Effizienz, Praktikabilität und Kompatibilität mit anderen Regelungen ist für die Ausgestaltung eines Emissionshandelssystems auch von Bedeutung, welche Minderungsoptionen hierdurch erschlossen werden können. Dabei sind neben den Potenzialen insbesondere die spezifischen Vermeidungskosten der einzelnen Maßnahmen von Bedeutung.

Grundsätzlich können die Treibhauswirkungen im Luftverkehr durch technische Maßnahmen an den Flugzeugen, durch flugsicherungstechnische Maßnahmen sowie durch operative Maßnahmen der Fluggesellschaften reduziert werden.

Technische Maßnahmen weisen in der Regel höhere spezifische Vermeidungskosten auf und benötigen meist längere Umsetzungszeiträume. Neben einer Optimierung der Triebwerke, die bisher ausschließlich im Hinblick auf die Treibstoffeffizienz optimiert wurden, unter Klimagesichtspunkten, fallen in die Kategorie der technischen Maßnahmen auch der Austausch älterer Triebwerke oder die frühzeitige Stilllegung von Flugzeugen. Darüber hinaus kann die Aerodynamik von im Betrieb befindlichen Flugzeugen u.a. durch das Anbringen von Winglets sowie das Auftragen von Riblets verbessert und folglich Treibstoffverbrauch und Klimawirksamkeit verringert werden.

Weitere Minderungsoptionen können durch die Einführung neuer Kommunikations-, Navigations- und Überwachungs- sowie Luftverkehrsmanagementsysteme (CNS/ATM) erschlossen werden. Durch entsprechende Änderungen der CNS/ATM-Systeme (neue digitale Technologien, stärkere Automatisierung, Ausbau der Satellitennavigation etc.) könnte die Routenführung insbesondere im Hinblick auf Flughöhe und Geschwindigkeit optimiert und Verspätungen und Staus im Luftraum reduziert werden.

Darüber hinaus können die Fluggesellschaften die Treibhauswirkung des Luftverkehrs durch operative Maßnahmen mindern. Dazu zählen Maßnahmen wie eine Verbesserung der Auslastung oder eine Verringerung des Fluggewichts z.B. durch veränderte Tankstrategien. Sofern eine umfassende Bemessungsgrundlage gewählt wird, die die gesamte Treibhauswirksamkeit des Luftverkehrs erfasst, besteht zusätzlich die Option, durch Optimierung der Flugrouten unter Klimagesichtspunkten die Entstehung von Kondensstreifen und Zirruswolken zu verhindern. Hierfür reicht es in der Regel aus, wenn auf den Streckenabschnitten, auf denen Kondensstreifen und Zirruswolken entstehen, die Reiseflughöhe um einige Fluglevels reduziert wird.

Insbesondere die zuletzt genannte Option ist aufgrund geringer Vermeidungskosten und großer Potenziale von besonderem Interesse. Je nachdem welcher Wirkungsbeitrag für Zirruswolken unterstellt wird, reichen die Vermeidungskosten von 0,2 bis zu 3 US\$/t CO₂ eq. und liegen damit unter den Zertifikatspreisen, die derzeit für Minderungskredite aus CDM-Projekten erwartet werden. Unter sehr ungünstigen Bedingungen könnten die Vermeidungskosten zwar auch 10 oder 15 US\$/t CO₂ erreichen, doch wenn Zirruswolken nur mit einem Anteil von etwa einem Viertel ihres heute als maximal betrachteten Beitrags zur luftverkehrsbedingten Treibhauswirkung berücksichtigt werden, liegen die Vermeidungskosten auch unter sonst sehr ungünstigen Bedingungen grundsätzlich unter 2,50 US\$/t CO₂. Das durch Flugroutenoptimierung erschließbare Vermeidungspotenzial hängt ebenfalls davon ab, in welchem Umfang Zirruswolken klimawirksam sind und ihre Bildung durch Tieferfliegen vermieden werden kann. Für den Fall, dass Zirruswolken mit ihrem maximalen Wirkungsbeitrag zu berücksichtigen sind, könnte die Treibhauswirkung des Luftverkehrs im Jahr 2010 allein durch diese Maßnahme um bis zu 1.100 t CO₂ eq. reduziert werden.

Neben der Flugroutenoptimierung könnte vor allem durch die frühzeitige Stilllegung von Flugzeugen ein beachtliches Minderungspotenzial erschlossen werden. Im Unterschied zur Flugroutenoptimierung sind die Vermeidungskosten aber erheblich höher und liegen in der Größenordnung zwischen 10 und 50 US\$/t CO₂ eq.

Zusammenfassend zeigt die vorliegende Studie, dass die Etablierung eines Emissionshandelssystems im internationalen Luftverkehr grundsätzlich möglich ist und damit eine Option darstellt, den Verpflichtungen aus Art. 2.2 des Kioto-Protokolls zur Begrenzung und Reduzierung der Treibhausgasemissionen des Luftverkehrs nachzukommen. Allerdings wird auch deutlich, dass hinsichtlich des Designs eines solchen Emissionshandelssystems erhebliche Gestaltungsspielräume bestehen. Wird beispielsweise lediglich CO₂ als Bemessungsgrundlage gewählt, so wird die Klimawirksamkeit des Luftverkehrs nicht vollständig erfasst und es kann unter Umständen sogar zu einer Erhöhung der Treibhauswirkung kommen. Darüber hinaus würde ein allein auf CO₂ basierendes Emissionshandelssystem die durch Flugroutenoptimierung erschließbaren, kostengünstigen Vermeidungspotenziale im Luftverkehr selbst ausschließen. Die Fluggesellschaften würden damit – zumindest bei einem offenen System – im Wesentlichen als Käufer von Emissionsrechten auftreten und nur in sehr beschränktem Umfang selbst zur Verringerung der Treibhauswirkung beitragen. Aus Umweltsicht besteht hier die Gefahr einer groben Fehlsteuerung.

Insofern sollte zumindest mittelfristig angestrebt werden, dass die gesamte Klimawirksamkeit des Luftverkehrs erfasst wird, so dass durch das Emissionshandelssystem umfassende Anreize zur effizienten Verringerung der gesamten Treibhauswirkung des Luftverkehrs gesetzt werden.

Wichtig für die Etablierung eines Emissionshandelssystems mit einer umfassenden Bemessungsgrundlage ist jedoch, dass der Wissenstand über die Entstehungs- und Wirkungszusammenhänge der einzelnen treibhauswirksamen Substanzen des Luftverkehrs verbessert wird. Dabei sollten insbesondere die Kenntnisse über Kondensstreifen und Zirruswolken vertieft werden, da hier vermutlich beträchtliche, kostengünstige Vermeidungspotenziale erschlossen werden können. Ziel derartiger Anstrengungen sollte sein, praktikable und allseits anerkannte Verfahren zu entwickeln, mit denen die Treibhauswirkungen dieser Substanzen verlässlich gemessen und miteinander verglichen werden können.

Dies dürfte nicht nur im Interesse der Regierungen der teilnehmenden Staaten sondern auch der Luftfahrtgesellschaften liegen. Denn mittelfristig müssen auch sie einen Beitrag zur Minderung der Treibhauseffektes leisten. Kostengünstige Potenziale sollten dabei nicht von vornherein ausgeschlossen, sondern sobald wie möglich durch entsprechende Anreize adressiert werden.

Wenn jedoch zunächst ein ausschließlich auf CO₂ basierendes Emissionshandelssystem eingeführt wird, so sollte dies durch Maßnahmen zur Begrenzung anderer Treibhauswirkungen des Luftverkehrs flankiert werden, da es sonst zu Fehlsteuerungen und einer nicht intendierten Erhöhung der Treibhauswirkung des Luftverkehrs kommen kann. Die Erhöhung der NO_x-Emissionen sollte dabei durch entsprechend stringente Emissionsgrenzwerte für Triebwerke und die Entstehung von Kondensstreifen und Zirruswolken durch eine Limitierung der Fluglevels in den Regionen begrenzt werden, in denen Kondensstreifen und Zirruswolken mit hoher Wahrscheinlichkeit entstehen.

8. Literatur

- AE (Atmospheric Environment) 2000: New Directions: Assessing the real impact of CO₂ emissions trading by the aviation industry. Atmospheric Environment 34 (2000) 5337 - 5338
- AEIG (Joint EMEP/CORINAIR Atmospheric Emission Inventory Guidebook) 2001a. Third Edition. European Environment Agency: Copenhagen. http://reports.eea.eu.int/technical_report_2001_3/en/page017.html
- AEIG (Joint EMEP/CORINAIR Atmospheric Emission Inventory Guidebook) 2001b. Third Edition. European Environment Agency, Copenhagen, http://reports.eea.eu.int/technical_report_2001_3/en/B851vs2.3spreadsheet1.pdf
- Airbus 2003: Persönliche Kommunikation, Airbus im März 2003
- Altmann, G. 2000: Dialog über Luftverkehr und Umweltschutz - Eröffnungsstatement von Gila Altmann, Parlamentarische Staatssekretärin im Bundesumweltministerium. Umwelt (4) S. 193 - 197
- Anker, R. 2000: Comparison of Airbus, Boeing, Rolls-Royce and AVITAS Market Forecasts 2000. In: Air & Space Europe, Vol. 2, No. 3
- AvioPlan 1999: Modellsystem zur routinemäßigen Ermittlung umweltoptimierter Flugstrecken als Beitrag zum Schutz des Klimas. UBA-Forschungsbericht 29641838, März 1999
- BA (British Airways) 2001a: British Airways and Climate Change: Our Views. <http://www.british-airways.com/responsibility/docs/environmental/emissions02.shtml>
- BA (British Airways) 2001b: From the Ground up – Social and Environmental Report 2001. London, http://www.britishairways.com/responsibility/docs/performing/report_2001.pdf
- Balashov, B./Smith, A. 1992: ICAO analyses – trends in fuel consumption by world's airlines. In: ICAO Journal, 47(8), p. 1821
- Brockhagen D./Lienemeyer M. 1999: European Aviation Levy to Internalise External Costs of Climate Change – Design and Implementation, taking into account Economic, Ecological, Legal and Political Constraints. Study on behalf of the Green Party in the German Bundestag
- Brockhagen, D. 1996: Statistische Untersuchung der Bedingungen für das Auftreten von Kondensstreifen". Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt (DLR), zitiert nach Brockhagen/Lienemeyer (1999)
- Butzengeiger, S./Betz, R./Bode, S. 2001: Making GHG Emissions Trading work – crucial Issues in designing national and international Emissions Trading Systems. HWWA Discussion Paper 154, Hamburg
- BUWAL (Bundesamt für Umwelt, Wald und Landschaft) 2000 :Luftverkehr – eine wachsende Herausforderung für die Umwelt. Fakten und Trends für die Schweiz. Materialienband M25. NFP 41/BUWAL/BAZL/ARE Dienst GVF
- CAEP (Committee on Aviation Environmental Protection) 2003: Atmospheric and Ground Level Effects of Aircraft emissions – RFP report. Working Group 3 Meeting, Agenda Item 5, Seattle, 10/11 April 2003
- Cames, M./Herold, A./Kohlhaas, M./Schumacher, K./Timpe, C. 2001: Analyse und Vergleich der flexiblen Instrumente des Kiotoprotokolls. Öko-Institut/Deutsches Institut für Wirtschaftsforschung. Gutachten für die Enquete- Kommission „Nachhaltige Energieversorgung unter den Bedingungen der Globalisierung und der Liberalisierung“ des Deutschen Bundestages, Berlin
- CE 2002a: External costs of aviation – Main report. CE Solution for environment, economy and technology, Delft

- CE 2002b: External costs of aviation – Background report. CE Solution for environment, economy and technology, Delft
- CE 2002c: Economic incentives to mitigate greenhouse gas emissions from air transport in Europe. Report commissioned by the European Commission DG Tren, Delft
- Chicago Convention 1944: Convention on International Civil Aviation, Signed at Chicago on 7. December 1994, <http://www.iasl.mcgill.ca/airlaw/public/chicago/chicago1944a.pdf>
- Cicero (Center for International Climate and Environmental Research Oslo) 2001: Assessing the metrics of climate change. Current methods and future possibilities. Report 2001:4, DLR (Deutsche Luft- und Raumfahrtgesellschaft): Treibstoffverbrauch und NO_x-Emissionen in Abhängigkeit von der Höhe (ohne Militär) bezogen auf das Jahr 1992. Persönliche Kommunikation mit Fichter, Chr.
- COM (1996) 549 -1: Commission Report to the Council and the European Parliament under Article 8(6) of Council Directive 92/81/EEC, on the Situation with Regard to the Exemptions or Reductions for Specific Policy Considerations as Set Out in Article 8(4) of Directive 92/81 and Concerning the Obligatory Exemption of Mineral Oils Used as Fuel for the Purpose of Air Navigation other than Private Pleasure Flying and the Exemptions or Reductions Possible for Navigation on Inland Waterways other than for Private Pleasure Craft as Set Out in Articles 8(1)(B) and 8(2)(B) of the Same Directive, Brussels
- COM (1997) 30: Proposal for a Council Directive Concerning the Restructuring of the Community Framework for the Taxation of Energy Products. Brussels
- COM (1999) 640 final: Communication from the Commission to the Council, the European Parliament, The Economic and Social Committee and The Committee of the Regions, Air Transport and the Environment, Towards meeting the Challenges of Sustainable Development. Brussels, 01.12.1999, http://europa.eu.int/eur-lex/en/com/cnc/1999/com1999_0640en01.pdf
- COM (2001) 581 – C5-0578/01 – 2001/0245(COD): Draft Opinion of the Committee on Legal Affairs and the Internal Market for the Committee on the Environment, Public Health and Consumer Policy on the Proposal for a Council directive on a Proposal for a Directive of the European Parliament and of the Council establishing a scheme for greenhouse gas emission allowance trading within the Community and amending Council Directive 96/61/EC
- COM (2001) 581: Proposal for a directive of the European Parliament and the Council establishing a framework for Greenhouse gas emissions trading within the European Community and amending Council Directive 96/61/EC (presented by the Commission)
- Cowe, R. 2001: Aviation aims for efficiency improvement, World Business Council for Sustainable Development. http://www.wbcsdmobility.org/news/cat_1/news_15/index.asp
- DNR (Deutscher Naturschutz Ring) 2001: EU-Verkehrsministerrat: Umweltverbände fordern europäische Flug-Emissionsabgabe. Pressehintergrundinformation 63/2001
- Dobbie, L. 1999: Airlines see direct link between improved environmental performance, sustainable growth. ICAO Journal (9): 15 - 17, 29
- Enquete Kommission (Enquete Kommission Globalisierung der Weltwirtschaft) 2002: Schlussbericht- Herausforderung und Antworten. Deutscher Bundestag. 14. Wahlperiode. Drucksache14/9200
- EPA (United States Environmental Protection Agency) 2000: Aircraft Contrails Fact sheet. <http://www.epa.gov/otag/regq/nonroad/aviation/contrails.pdf>
- Europäische Kommission 1999: Communication from the Commission to the Council, the European Parliament, the Economic and Social Committee and the Committee of

- the Regions: Air transport and the environment, Towards Meeting the Challenges of Sustainable Development, COM (1999) 640 final
- Europäische Kommission 2000: Communication from the Commission to the Council, the European Parliament, the Economic and Social Committee and the Committee of the Regions: Taxation of aircraft fuel, COM (2000) 110 final
- Europäische Kommission 2001a: Commission staff working paper: Recommendations on a strategy for development of market based measures, SEC (2001) 1212
- Europäische Kommission 2001b: Commission staff working paper: Recommendations on a strategy for emissions' certification, SEC (2001) 1210
- Europäische Kommission 2001c: Mitteilung der Kommission an den Rat, das Europäische Parlament, den Wirtschafts- und Sozialausschuss und den Ausschuss der Regionen zum sechsten Aktionsprogramm der Europäischen Gemeinschaft für die Umwelt. KOM (2001) 31 final
- Federal Office for Civil Aviation Switzerland 2000: Aerodrome Charges – Zurich Airport. GEN 4.1 LSZH. AIP Switzerland, Berne
- Feess, Eberhard 1997: Mikroökonomie – Eine spieltheoretisch- und anwendungsorientierte Einführung. Metropolis-Verlag, Marburg
- Fichtner, C. 2003: Tradeoffs in Contrail and CO₂ Radiative Forcing by Altered Cruise Altitudes. Präsentation bei der European Conference on Aviation, Atmosphere and Climate, Friedrichshafen, 30.06.-03.07.2003
- Germanwatch 2001: Mit Klimaschutz im Flugverkehr beginnen! Beschlüsse des Kioto-Protokolls zum Flugverkehr jetzt umsetzen. Presseerklärung, <http://www.germanwatch.org/pubpress/p010925a.htm>
- Grewe, V./Dameris M./Hein, R./Köhler, I./Sausen, R. 1999: Impact of future subsonic aircraft NO_x emissions on the atmospheric composition. In: Geophysical Research Letters, Vol. 26, No. 1, pp. 47 - 50
- Grewe, V./Dameris, M./Fichter, Chr./Lee, D. 2002: Impact of aircraft NO_x emissions. Part 2: Effects of lowering the flight altitude. In: Meteorologische Zeitschrift, Vol.11, No. 3, pp. 199 - 207
- ICAO (International Civil Aviation Organisation) 1995 : ICAO Engine Exhaust Emissions Data Bank. Doc 9646-AN/943. First Edition
- ICAO 1996: Council Resolution on Environmental Charges and Taxes. Adopted by the Council on 9 December 1996 at the 16th Meeting of its 149th Session
- ICAO 2001a: Resolutions Adopted at the 33rd Session of the Assembly. http://www.icao.int/icao/en/assembl/a33/resolutions_a33.pdf
- ICAO 2001b: Resolution 14/1 – Consolidated statement of continuing ICAO policies and practices related to environmental protection. A33-WP/283, EX98, Addendum No. 1, http://www.icao.int/icao/en/assembl/a33/wp/wp283a01_en.djvu
- ICAO 2002: Operational Opportunities to Minimize Fuel Use And Reduce Emissions. Montreal
- ICAO/CAEP (Committee on Aviation Environmental Protection) 2000: Marked-bases Measures: Report of the Working Group 5 to the fifth Meeting of the Committee on Aviation Environmental Protection. Revised 11/21. 08.01.2002
- ICAO/CAEP 2001a: CAEP Work Programme, <http://www.icao.int/icao/en/env/caepwrkp.htm>. 08.01.2002
- ICAO/CAEP 2001b: Steering Group Meeting: Emissions Trading. Draft Paper presented by Rapporteurs of WG 5
- ICSA 2000: Aviation and its Impacts on the Global Atmosphere: A Position Paper of the International Coalition for Sustainable Aviation. <http://www.t-e.nu/Fact-sheets,%20responses,%20etc/9-00%20ICSA%20position%20paper%20-%20aviation%20and%20global%20atmosphere.htm>

- INRETS (Institut National de Recherche sur les Transports et leur sécurité) 1999 : Methods of estimation of atmospheric emissions from transport – European scientist network an scientific state-of-the-art, <http://www.inrets.fr/infos/cost319/C319finalreport.pdf>
- IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change) 1995: Climate Change. The Science of Climate Change 2nd Assessment Report
- IPCC 1999: Aviation and the Global Atmosphere. A Special Report of IPCC Working Groups I and III. Cambridge
- IPCC 2000: Good Practice Guidance and Uncertainty Management in National Greenhouse Gas Inventories. IPCC National Greenhouse Gas Inventory Programme
- IPPR (Institute for Public Policy Research) 2000: Plane Trading-Policies for reducing the climate change effects of international aviation. By Chris Hewett and Julie Foley. August 2000. London
- Kalivoda, M./Kudrna M. 1997: Methodologies for Estimating Emissions from Air Traffic. Meet Project Contract No. ST-96-SC.204 COST 319 Action. Subgroup D2: Air Transport. <http://www.inrets.fr/infos/cost319/MEETDeliverable18.PDF>
- Kirwin, J. 2000: Limited support seen for EU-wide tax on aviation fuel to cut GHG emissions. In: International Environment Reporter, Vol. 23, No. 8, p. 305
- Kirwin, J./Blau, J. 1999: G-8 Meeting said to send Signal of need for "Greater Attention" to Environment. In: International Environment Reporter, Vol. 22, No. 7, p. 269
- Koller, H./Weber S. 2001: Branchenpräsentation der Flugzeugindustrie unter marktlichen und wettbewerblichen Aspekten. Universität der Bundeswehr Hamburg, Fachbereich WOW, Professur für Betriebswirtschaftslehre, Hamburg
- Kulick, H. 2001a: Auch die grüne Klientel ist Täter und Opfer. Interview zur Luftverkehrsabgabe. Spiegel-online, <http://www.spiegel.de/politik/deutschland/0,1518,121309,00.html>
- Kulick, H. 2001b: Grüne wollen Fliegen teurer machen. Spiegel-online. <http://www.spiegel.de/politik/deutschland/0,1518,121346,00.html>
- Lee D./Sausen R. 2000: New Directions: Assessing the real impact of CO₂ emissions trading by the aviation industry. Atmospheric Environment, Vol. 34, pp. 5337 - 5338
- Leggett, J./Pepper, W.J./Swari, R.J. 1992: Emissions scenarios for the IPCC - an update. Climate Change 1992, The Supplementary Report to the IPCC Scientific Assessment, Cambridge University Press, Cambridge, pp. 68 - 95, cited in: Vedantham, A./Oppenheimer, M. 1998
- Lindenmayer 2002: Persönliche Kommunikation mit Herrn Lindenmayer, Deutsche Flugsicherung, August 2002
- Lyon, R. 1986: Equilibrium Properties of Auctions and Alternative Procedures for Allocation of Transferable Permits. Journal of Environmental Economics and Management, Vol. 13, pp. 129 - 152
- Mannstein, H. 2003a: Persönliche Kommunikation
- Mannstein, H. 2003b: Observation of contrails and cirrus over Europe. Präsentation bei der European Conference on Aviation, Atmosphere and Climate, Friedrichshafen, 02.07.2003
- Marquart, S./Ponater, M./Mager, F./Sausen, R. 2003: Future Development of Contrail Cover, Optical depth and Radiative Forcing – Impact of Increasing Air Traffic and Climate Change. In: Journal of Climate, Vol. 16, pp. 2.890 - 2.904
- Meskill, T. (ed.) 2002: Current Market Outlook 2002. Boeing Commercial Airplane Group, Seattle, WA, USA
- Mrasek, V. 2003: Das zweite Leben der Kondensstreifen – Flugzeuge heizen das Klima via Wolkenbildung offenbar stärker auf als durch Kohlendioxid. In: Frankfurter

- Rundschau 16.07.2003, http://www.fr-aktuell.de/uebersicht/alle_dossiers/politik_ausland/treibhaus_erde/?cnt=250907
- MTPWW (Ministry of Transport, Public Works and Watermanagement, Eds.) 2002: Aviation Emissions and Evaluation of Reduction Options (AERO). Main Report, The Hague
- MVA/DNAL (Dutch National Aerospace Laboratory)/IIAS (International Institute of Air and Space) 1999. Analysis of the taxation of aircraft fuel. Consortium: Resource Analysis, on behalf of the European Commission, Delft
- Nielsen, S.K. 2001: Determinants of Air Travel Growth. In: World Transport Policy and Practice, Vol. 7, No. 2, pp. 28 - 37
- RAC-France (Réseau Action Climat-France) 2001: EU Environment Council 29th October 2001 Climate Change Conclusions, http://www.rac-f.org/documents/UE_envcoun_cil.htm
- Rand Europe 2002: Entwicklung eines Vorschlages für eine Absenkung des derzeit gültigen internationalen Grenzwertes für Stickoxidemissionen von Flugzeugen unter Berücksichtigung der aktuellen und zukünftigen technischen Möglichkeiten. Berlin
- Sausen, R. 2002: Persönliche Kommunikation
- Sausen, R. 2002: Persönliche Kommunikation mit Sausen, Deutsche Luft- und Raumfahrtgesellschaft; Juni 2002
- Sausen, R. 2003: Persönliche Kommunikation mit Sausen, Deutsche Luft- und Raumfahrtgesellschaft; Juni 2003
- Sausen, R./Lee, D. 2003: Persönliche Kommunikation
- Schmidt A. 1994: Die Anwendbarkeit der umweltökonomischen Lizenzlösung auf die Umweltbelastungen durch den zivilen Luftverkehr. Europäische Hochschulschriften, Reihe V, Bd./Vol. 1614, Frankfurt am Main
- Schumann, U. 2000a: Effects of Aircraft Emissions on Ozone, Cirrus Clouds and Global Climate. Air & Space Europe. Vol.2. No.3. <http://www.aero-net.org/lib/articles/029-033%20schumann.pdf>
- Schumann, U. 2000b: Influence of Propulsion Efficiency on Contrail Formation. Aerospace Science and Technology. Band 4. Heft 6. S. 391 - 402
- Shell 1993: Shell briefing services. In: Fuelling aviation, No 4
- Siebenthal, M. 2001. Marktstruktur des Flugverkehrs – Eine Analyse unter besonderer Berücksichtigung der Theorie der Netzwerküter. Seminararbeit am Wirtschaftswissenschaftlichen Zentrum, Universität Basel
- Sledsen, T 1998: The Need for a European Aviation Charge. T&E <http://www.t-e.nu/Publications/1998%20pubs/T&E%2098-1.pdf>
- Somerville, H. 2001: Making Aviation Sustainable. <http://www.gacc.org.uk/source/SusAviation.htm>
- Stratus Consulting 2002: Controlling Carbon Dioxide Emissions from the Aviation Sector. Prepared for the Federal Environmental Agency (UBA) of Germany, prepared by Henderson, J./Ries, H., Boulder
- Stronzik, M./Cames, M. 2002: Wissenschaftliche Vorbereitung einer Stellungnahme zum Entwurf einer Direktive zur Implementierung eines EU-weiten Emissionshandels COM (2001) 581. Endbericht im Auftrag des Ministeriums für Umwelt und Verkehr Baden-Württemberg
- SZ (Süddeutsche Zeitung) 08.08.2002: Klimaveränderung durch Kondensstreifen
- T&E (Transport & Environment) 2001: To EU 15 Environment Ministers – Re: Aviation and the Environment: call for action. Annex: CAEP/5-WP/82. <http://www.t-e.nu/Fact->

[sheets,%20responses,%20etc/2-2001%20-%20Joint%20aviation%20letter%20to%20ministers.pdf](#)

- Travis, David J./Carleton†, Andrew M./Lauritsen, Ryan G. 2002: Contrails reduce daily temperature range – A brief interval when the skies were clear of jets unmasked an effect on climate. In: Nature, Vol. 418, 8 AUGUST 2002, p. 601
- Treber, M. 1999: Luftverkehr und Klima. Diskussionspapier, Germanwatch, <http://www.germanwatch.org/rio/dpflug.htm>
- Treber, M. 2001: Europäische Union muss mit Emissionsabgaben im Flugverkehr vorangehen! <http://www.germanwatch.org/kliko/k14icao.htm>
- Tsai, A.P.J./Petsonk A. 2000: Tracking the Skies – An Airline-Based System for Limiting Greenhouse Gas Emissions From International Civil Aviation. Environmental Defence Fund, http://www.environmentaldefense.org/documents/704_TrackingTheSkies.pdf
- TÜV Rheinland/Berlin-Brandenburg, DIW (Deutsches Institut für Wirtschaftsforschung), Wissenschaftszentrum Nordrhein-Westfalen, Wuppertal Institut für Klima, Umwelt, Energie 2000: Maßnahmen zur verursacherbezogenen Schadstoffreduzierung des zivilen Flugverkehrs. Im Auftrag des Umweltbundesamtes, Köln
- UNFCCC 2001: Climate Change COP 7 – Marrakech, Final Report
- UNFCCC/SBSTA 1999: Report of the Subsidiary Body for Scientific and Technological Advice on its Eleventh Session, Bonn 25 October - 5 November 1999 (FCCC/SBSTA/1999/14)
- UNFCCC/SBSTA/1996/9/Add.2: National Communications. Communications from Parties included in Annex I to the Convention: Guidelines, Schedule and Process for Consideration
- US DOE (United States Department of Energy 1999: Fuel use data for the period 1986 - 1997. In: International Energy Annual, Washington/DC, <http://www.eia.doe.gov/iea>
- Vedantham, A./Oppenheimer, M. 1998: Long-term Scenarios for Aviation: Demand and Emissions of CO₂ and NO_x. In: Energy Policy, Vol. 26, No. 8, pp. 625 - 641
- WBGU (Wissenschaftlicher Beirat der Bundesregierung Globale Umweltveränderung) 2002: Entgelte für die Nutzung globaler Gemeinschaftsgüter. Sondergutachten. Berlin. http://www.wbgu.de/wbgu_sn2002.pdf
- Weimann, Joachim 1991: Umweltökonomik – Eine theorieorientierte Einführung. 2. Auflage, Springer-Verlag. Berlin et al.
- Williams, V./Noland, R./Toumi, R. 2002a: Reducing the climate change impacts of aviation by restricting cruise altitudes. Transportation Research Part D, No. 7, pp. 451 - 464
- Williams, V./Noland, R./Toumi, R. 2002b: Air Transport Cruise Altitude Restrictions to Minimize Contrail Formation. Centre for Transport Studies. Paper submitted for Presentation to the 82nd Annual Meeting of the Transportation Research Board