



Die Einbeziehung des Luftverkehrs in internationale Klimaschutz- protokolle (AviClim)

Abschlussbericht

**BMBF-Vorhaben „Ökonomie des Klimawandels“,
Förderkennzeichen 01LA1138A**

Janina Scheelhaase, Katrin Dahlmann, Martin Jung, Herrmann
Keimel, Melanie Murphy, Hendrik Nieße, Robert Sausen,
Martin Schaefer und Florian Wolters

**Deutsches Zentrum
für Luft- und Raumfahrt e.V.**

in der Helmholtz-Gemeinschaft

Institut für Flughafenwesen und Luftverkehr
Porz-Wahnheide
Linder Höhe
51147 Köln

Institutsleiter: Prof. Dr. Johannes Reichmuth

web: <http://www.dlr.de/fw>

© 2015, DLR - Institut für Flughafenwesen und Luftverkehr

Dieses Werk einschließlich aller seiner Teile ist urheberrechtlich geschützt. Jede Verwendung innerhalb und außerhalb der Grenzen des Urheberrechtsgesetzes ist ohne Zustimmung des DLR, Institut für Flughafenwesen und Luftverkehr, unzulässig und wird zivil- und strafrechtlich verfolgt. Dies gilt insbesondere für Vervielfältigungen, Übersetzungen, Mikroverfilmungen und die Einspeicherung und Verarbeitung in elektronischen Systemen.

Inhalt

Zusammenfassung	10
Extended Abstract	15
1 Hintergrund, Problemstellung und Herangehensweise	26
2 Metriken	28
2.1 Anforderungen bei der Wahl von Metriken	29
2.2 Welche Metriken gibt es?	30
2.3 Klimafragen und die richtige Metrik	34
2.4 Berechnung der Klimawirkung	36
2.5 Wahl der Metrik	38
3 Emissionsmodellierung	42
3.1 Modellbeschreibung	42
3.2 Annahmen für das Business-as-usual-Szenario	43
3.3 Emissionsprognose bis 2030 im BAU Szenario	46
3.4 Kombination des BAU-Szenario mit 4D-Race	49
4 Konzeption der politischen Maßnahmen und Szenarien	51
4.1 Konzeption der politischen Maßnahmen	51
4.1.1 Analyisierte Instrumente im Überblick	51
4.1.2 Beurteilungskriterien	56
4.1.3 Ergebnisse	57
4.2 Konzeption der geopolitischen Szenarien	75
5 Modellierungsergebnisse: Modellkette, Kosten und Nachfrageeffekte der klimapolitischen Maßnahmen	80
5.1 Übersicht über die angewandte Modellkette	80
5.2 Klimarelevante Emissionen in den geopolitischen Szenarien	81
5.2.1 Methodik	81
5.2.2 Ergebnisse	83
5.3 Kosten der klimapolitischen Maßnahmen	86
5.3.1 Annahmen und Ergebnisse für den Luftverkehrssektor	86
5.3.2 Kostenbelastung ausgewählter Gruppen von Fluggesellschaften	100
5.3.2.1 Bestimmungsfaktoren für die Höhe der einzelwirtschaftlichen Kostenbelastungen	100
5.3.2.2 Methodischer Ansatz	103
5.3.2.3 Ergebnisse	108
5.4 Nachfrageeffekte der klimapolitischen Maßnahmen	115
6 Modellierungsergebnisse: Effekte der klimapolitischen Maßnahmen auf die Verkehrsleistung, die klimarelevanten Emissionen und die Klimawirkung	129
6.1 Effekte der klimapolitischen Maßnahmen auf die Verkehrsleistung	129
6.2 Effekte der klimapolitischen Maßnahmen auf die klimarelevanten Emissionen und die Klimawirkung des Luftverkehrs	135
6.2.1 Methodik	135
6.2.1.1 Reduzierung der Emissionen	135
6.2.1.2 Berechnung der Temperaturänderung	135
6.2.1.3 Berechnung der Klimawirkung des CO ₂ -Zukaufs aus anderen Sektoren	136
6.2.2 Ergebnisse	137
6.2.2.1 CO ₂ -Äquivalente	137
6.2.2.2 Temperaturänderung	139

7	Modellierungsergebnisse: Beschäftigungseffekte der klimapolitischen Maßnahmen.....	144
7.1	Methodik.....	144
7.1.1	Luftverkehrsgesellschaften.....	144
7.1.2	Luftfahrtindustrie und Flughäfen.....	147
7.2	Beschäftigungseffekte der klimapolitischen Maßnahmen.....	148
7.2.1	Szenario "Greater EU".....	149
7.2.2	Szenario "Great Aviation Countries".....	151
7.2.3	Szenario "World".....	153
7.2.4	Vergleich der geopolitischen Szenarien.....	155
7.2.5	Exemplarische Darstellung weiterer Szenarien-Instrumenten-Kombinationen.....	156
7.3	Exkurs: Gesellschaftlicher Nutzen der klimapolitischen Maßnahmen im Luftverkehr.....	160
8	Wesentliche Ergebnisse, Empfehlungen und Ausblick.....	167
8.1	Hintergrund der Untersuchung, wesentliche Ergebnisse und Empfehlungen.....	167
8.2	Ausblick.....	171
	Literatur.....	173
A.	Anhang.....	184

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1-1: AviClim Arbeitspakete.....	27
Abbildung 2-1: Schematische Darstellung der Wirkungskette von den Emissionen bis zu den durch die Klimaänderung verursachten Schäden.....	29
Abbildung 2-2: Höhenprofil der CO ₂ -Äquivalente	38
Abbildung 3-1: Modellkette zur Quantifizierung der Emissionen des Luftverkehrs	42
Abbildung 3-2: Annahmen zur durchschnittlichen Lebensdauer von Flugzeugklassen.....	44
Abbildung 3-3: Produktionszeiträume großer Verkehrsflugzeuge und Größenverteilung neu ausgelieferter Flugzeuge	45
Abbildung 3-4: Flottenentwicklung im BAU-Szenario	46
Abbildung 3-5: Treibstoffverbrauch des Luftverkehrs im BAU-Szenario	47
Abbildung 3-6: NO _x -Emissionen des Luftverkehrs im BAU-Szenario	48
Abbildung 3-7: Verteilung der NO _x -Emissionen des Luftverkehrs in den Jahren 2010/2030 in der Business-as-usual-Entwicklung	50
Abbildung 4-1: Kategorien der betrachteten politischen Instrumente	52
Abbildung 4-2: AviClim-Szenarien im Überblick.....	77
Abbildung 5-1: Vereinfachte Darstellung der AviClim-Modellkette.....	81
Abbildung 5-2: Vergleich der weltweiten Klimawirkung (atr 50) durch verschiedene Emissionen, jeweils ohne und mit isolierten operationellen Maßnahmen.....	86
Abbildung 5-3: Vergleich der Effekte der Metriken auf die Gesamtkosten für das Instrument Climate Tax, Low Price Scenario, Angaben für 2030 in Mrd. USD	94
Abbildung 5-4: Vergleich der Kostenentwicklung der klimapolitischen Instrumente, Scenario "World", atr 20, High Price Scenario, Angaben in Mrd. USD	95
Abbildung 5-5: Vergleich der Kostenentwicklung der klimapolitischen Instrumente, Scenario "World", atr 20, Mixed Price Scenario, Angaben in Mrd. USD	96
Abbildung 5-6: Veränderung der Nachfrage nach Luftverkehrsdienstleistungen durch die Klimasteuer im Scenario "World", atr 20, High Price Scenario, differenziert nach Überwälzungsfällen 1 - 3.....	127
Abbildung 5-7: Entwicklung der Nachfrage nach Luftverkehrsdienstleistungen in Scenario "World", atr 20, Low Price Scenario, Überwälzungsfall 2, in Mrd. USD	128
Abbildung 6-1: Veränderung der Verkehrsleistung (RTKs) in Scenario "Great Aviation Countries", atr 20, Low Price Scenario, Überwälzungsfall 2, in Prozent ggü. Business-as-usual-Entwicklung.....	133
Abbildung 6-2: Veränderung der Verkehrsleistung (RTKs) in Scenario "Great Aviation Countries", atr 20, Low Price Scenario, Überwälzungsfall 3, in Prozent ggü. Business-as-usual-Entwicklung.....	134

Abbildung 6-3: Zeitliche Entwicklung des globalen Treibstoffverbrauchs des Luftverkehrs	136
Abbildung 6-4: Klimawirkung in CO ₂ -Äquivalenten [Tg] für verschiedene klimapolitische Maßnahmen unter Annahme des geopolitischen Szenarios „Great Aviation Countries“ und „Mixed Price Scenario“ unter Berücksichtigung von Emissionseinsparungen durch Zukäufe aus anderen Sektoren	138
Abbildung 6-5: Vergleich der geopolitischen Szenarien „Greater EU“, „Great Aviation Countries“ und „World“ in Bezug auf ihre Klimawirkung für die jeweilige Maßnahme (Low Price Scenario)	139
Abbildung 6-6: Zeitlicher Verlauf der Temperaturänderung in den Szenarien "Greater EU" (Low Price Scenario) und "World" (High Price Scenario) im Vergleich zum Business-as-usual-Szenario	140
Abbildung 6-7: Überblick über die relative Reduzierung der Klimawirkung durch die verschiedenen klimapolitischen Instrumente in Abhängigkeit von der gewählten geopolitischen Region und der Annahmen zur Preisentwicklung	142
Abbildung 6-8: Änderung der Gesamtklimawirkung relativ zum BAU-Szenario und die Beiträge der einzelnen Klimaspezies zu dieser Änderung	143
Abbildung 7-1: Regressionsergebnisse für Basispreise und Zahl der Erwerbstätigen im belgischen Luftverkehr im Zeitraum 1995-2008	146
Abbildung 7-2: Szenario "Greater EU": Zahl der Erwerbstätigen (1.000) direkt und indirekt weltweit im Instrumentenvergleich, atr 50, Preiselastizität -0,8, High Price Scenario	150
Abbildung 7-3: Szenario "Great Aviation Countries": Zahl der Erwerbstätigen (1.000) direkt und indirekt weltweit im Instrumentenvergleich, atr 50, Preiselastizität -0,8, High Price Scenario	152
Abbildung 7-4: Szenario "World": Zahl der Erwerbstätigen (1.000) direkt und indirekt weltweit im Instrumentenvergleich, atr 50, Preiselastizität -0,8, High Price Scenario	154
Abbildung 7-5: Vergleich der geopolitischen Szenarien: Zahl der Erwerbstätigen (1.000) direkt und indirekt weltweit, Klimasteuer, atr 50, Preiselastizität -0,8, High Price Scenario	155
Abbildung 7-6: Vergleich der geopolitischen Szenarien: "Annex-I-Countries" und "Great Aviation Countries": Zahl der Erwerbstätigen (1.000) direkt und indirekt weltweit, Klimasteuer, atr 50, Preiselastizität -0,8, High Price Scenario	156
Abbildung 7-7: Szenario "World": Zahl der Erwerbstätigen (1.000) direkt und indirekt weltweit, Klimasteuer, atr 20 und atr 50, Preiselastizität -0,8, High Price Scenario	157
Abbildung 7-8: Szenario "World": Zahl der Erwerbstätigen (1.000) direkt und indirekt weltweit im Instrumentenvergleich, atr 50, Preiselastizität -0,8, Mixed Price Scenario	158
Abbildung 7-9: Szenario "World": Zahl der Erwerbstätigen (1.000) direkt und indirekt weltweit, Klimasteuer, atr 20 und atr 50, Preiselastizität -0,8 und -2,1, High Price Scenario	159

Abbildung 7-10: Veränderung des Barwerts der Schadenskosten in Abhängigkeit
vom gewählten Diskontfaktor 163

Tabellenverzeichnis

Tabelle 2-1: Klimawirkung der Route Dubai-Singapur für Pulsemissionen (P2010)
bzw. konstante Emissionen (S2010)..... 40

Tabelle 3-1: Ergebnisse der Prognose im Business-As-Usual Szenario..... 47

Tabelle 4-1: Liste der ausgewählten Instrumente 58

Tabelle 4-2: ICAO-Ranking der Staaten nach Anteil der von ihren Fluggesell-
schaften durchgeführten geplanten Luftverkehre in den Jahren
2008, 2009 und 2010 78

Tabelle 4-3: AviClim Untersuchungsansatz im Überblick 79

Tabelle 5-1: Emissionen bei reduzierter Flughöhe 83

Tabelle 5-2: Übersicht über die unter die jeweiligen geopolitischen Szenarien
fallenden Mengen an CO₂-Äquivalenten, Metrik atr 50, in Mio.
Tonnen..... 84

Tabelle 5-3: Übersicht über die unter die jeweiligen geopolitischen Szenarien
fallenden Mengen an CO₂-Äquivalenten unter Berücksichtigung
der operationellen Maßnahmen, Metrik atr 50, in Mio. Tonnen 84

Tabelle 5-4: Übersicht über die unter die jeweiligen geopolitischen Szenarien
fallenden Mengen an CO₂-Äquivalenten, Metrik atr 20, in Mio.
Tonnen..... 85

Tabelle 5-5: Übersicht über die unter die jeweiligen geopolitischen Szenarien
fallenden Mengen an CO₂-Äquivalenten unter Berücksichtigung der
operationellen Maßnahmen, Metrik atr 20, in Mio. Tonnen 85

Tabelle 5-6: Annahmen zur Preisentwicklung pro Tonne CO₂-Äquivalent, in USD 89

Tabelle 5-7: Gesamtkosten für klimapolitische Instrumente in Mrd. USD; Low
Price Scenario 91

Tabelle 5-8: Gesamtkosten für klimapolitische Instrumente in Mrd. USD; High
Price Scenario 92

Tabelle 5-9: Gesamtkosten für klimapolitische Instrumente in Mrd. USD; Mixed
Price Scenario 93

Tabelle 5-10: Kostenbelastung durch ausgewählte klimapolitische Instrumente pro
Passagier und Flugsegment für Beispielflüge 98

Tabelle 5-11: Absolute Kostenbelastung ausgewählter Gruppen von Fluggesell-
schaften durch die Klimasteuer und den Emissionshandel 109

Tabelle 5-12: Spezifische Kostenbelastung ausgewählter Gruppen von Fluggesell-
schaften durch die Klimasteuer und den Emissionshandel 110

Tabelle 5-13: Veränderung der spezifischen Emissionen und des Erfüllungsfaktors
für ausgewählte Gruppen von Fluggesellschaften 112

Tabelle 5-14: Preiselastizitäten der Nachfrage im Personenverkehr differenziert
nach Reisezweck und Verkehrsträger 116

Tabelle 5-15: Preiselastizitäten der Nachfrage im Luftverkehrsbereich.....	116
Tabelle 5-16: Entwicklung der Nachfrage nach Luftverkehrsdienstleistungen, starre Preiselastizität; in Mrd. USD; Low Price Scenario, High Price Scenario sowie Mixed Price Scenario; identisch mit Business-as-usual Nachfrageentwicklung	120
Tabelle 5-17: Entwicklung der Nachfrage nach Luftverkehrsdienstleistungen, Preiselastizität = -0,8; in Mrd. USD; Low Price Scenario.....	121
Tabelle 5-18: Entwicklung der Nachfrage nach Luftverkehrsdienstleistungen, Preiselastizität = -2,1; in Mrd. USD; Low Price Scenario.....	122
Tabelle 5-19: Entwicklung der Nachfrage nach Luftverkehrsdienstleistungen, Preiselastizität = -0,8; in Mrd. USD; High Price Scenario.....	123
Tabelle 5-20: Entwicklung der Nachfrage nach Luftverkehrsdienstleistungen, Preiselastizität = -2,1; in Mrd. USD; High Price Scenario.....	124
Tabelle 5-21: Entwicklung der Nachfrage nach Luftverkehrsdienstleistungen, Preiselastizität = -0,8; in Mrd. USD; Mixed Price Scenario.....	125
Tabelle 5-22: Entwicklung der Nachfrage nach Luftverkehrsdienstleistungen, Preiselastizität = -2,1; in Mrd. USD; Mixed Price Scenario.....	126
Tabelle 6-1: Entwicklung der Verkehrsleistung, starre Preiselastizität; in Mrd. RTKs; Low Price Scenario, High Price Scenario sowie Mixed Price Scenario; identisch mit Business-as-usual Entwicklung.....	130
Tabelle 6-2: Entwicklung der Verkehrsleistung, Preiselastizität = -0,8; in Mrd. RTKs; Low Price Scenario.....	131
Tabelle 6-3: Entwicklung der Verkehrsleistung, Preiselastizität = -2,1; in Mrd. RTKs; Low Price Scenario.....	132
Tabelle 6-4: Reduzierung der CO ₂ -Äquivalente für ausgewählte Varianten (Metrik atr 50).....	137
Tabelle 7-1: Nationale Input-Output Tabellen: Länderliste.....	145
Tabelle 7-2: Zahl der Erwerbstätigen (1.000) direkte und indirekte Effekte weltweit - Business-as-usual	148
Tabelle 7-3: Scenario "Greater EU": Zahl der Erwerbstätigen (1.000) direkte und indirekte Effekte weltweit - Emissionshandel, atr 50, Preiselastizität -0,8 (Fall 2)	149
Tabelle 7-4: Scenario "Greater EU": Zahl der Erwerbstätigen (1.000) direkte und indirekte Effekte weltweit - Klimasteuer, atr 50, Preiselastizität -0,8 (Fall 2)	149
Tabelle 7-5: Scenario "Greater EU": Zahl der Erwerbstätigen (1.000) direkte und indirekte Effekte weltweit - NO _x -Entgelt, atr 50, Preiselastizität -0,8 (Fall 2)	150
Tabelle 7-6: Scenario "Great Aviation Countries": Zahl der Erwerbstätigen (1.000) direkte und indirekte Effekte weltweit - Emissionshandel, atr 50, Preiselastizität -0,8 (Fall 2)	151
Tabelle 7-7: Scenario "Great Aviation Countries": Zahl der Erwerbstätigen (1.000) direkte und indirekte Effekte weltweit - Klimasteuer, atr 50, Preiselastizität -0,8 (Fall 2)	151

Tabelle 7-8: Szenario "Great Aviation Countries": Zahl der Erwerbstätigen (1.000) direkte und indirekte Effekte weltweit - NO _x -Entgelt, atr 50, Preiselastizität -0,8 (Fall 2)	152
Tabelle 7-9: Szenario "World": Zahl der Erwerbstätigen (1.000) direkte und indirekte Effekte weltweit - Emissionshandel, atr 50, Preiselastizität -0,8 (Fall 2)	153
Tabelle 7-10: Szenario "World": Zahl der Erwerbstätigen (1.000) direkte und indirekte Effekte weltweit - Klimasteuer, atr 50, Preiselastizität -0,8 (Fall 2)	153
Tabelle 7-11: Szenario "World": Zahl der Erwerbstätigen (1.000) direkte und indirekte Effekte weltweit - NO _x -Entgelt, atr 50, Preiselastizität -0,8 (Fall 2)	154
Tabelle 7-12: Überblick über Literaturergebnisse zu externen Kosten von CO ₂ bzw. CO ₂ -Äquivalenten.....	165

Zusammenfassung

1. AviClim Problemstellung

Der globale Luftverkehr ist ein kontinuierlich wachsender Wirtschaftssektor. Gleichzeitig trägt der Luftverkehr zum anthropogenen Klimawandel bei. Zu den klimarelevanten Emissionen gehören neben Kohlendioxid auch Stickoxide, Schwefeloxide, Wasserdampf, Ruß, Kondensstreifen und Zirren. Seit dem Jahr 1990 ist ein kontinuierlicher Anstieg der verkehrsbedingten Kohlendioxid- (CO_2) und anderen klimarelevanten Emissionen wie Stick- (NO_x) und Schwefeloxide (SO_x), Wasserdampf (H_2O), Ruß, Kondensstreifen und Zirren zu verzeichnen (Sausen et al., 2005). Im Jahre 2005 trugen die weltweiten CO_2 -Emissionen des Luftverkehrs zu etwa 1,6 % zum gesamten Strahlungsantrieb bei (Lee et al., 2009). Berücksichtigt man zusätzlich die übrigen Klimaeffekte des Luftverkehrs, lag dieser Wert mit etwa 4,9 % sogar dreimal so hoch (Lee et al., 2009). In Anbetracht des für die kommenden Jahre erwarteten kontinuierlichen Wachstums des Luftverkehrs in Höhe von 3 bis 6 % p. a. je nach Weltregion (vgl. hierzu z. B. Airbus, 2013), erscheint es dringend erforderlich, Maßnahmen zur Begrenzung der gesamten klimarelevanten Emissionen des Luftverkehrs zu ergreifen. Das vom Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) geförderte Projekt „AviClim“ („Including Aviation in International Protocols for Climate Protection“) hat die Machbarkeit der Einbeziehung aller klimarelevanten Emissionen des Luftverkehrs in internationale Klimaschutzprotokolle und die damit verbundenen ökonomischen und ökologischen Effekte analysiert. Das Deutsche Zentrum für Luft- und Raumfahrt (DLR) e. V. hat diese Untersuchung im Zeitraum 10/2011 – 03/2015 durchgeführt.

2. Methodischer Ansatz

Im Rahmen von AviClim wurden verschiedene umweltökonomische Instrumente und operationelle Maßnahmen, alternative Metriken zur Quantifizierung der Klimaeffekte insbesondere der Nicht- CO_2 -Emissionen des Luftverkehrs sowie unterschiedliche Szenarien der internationalen Umsetzung von klimaschützenden Maßnahmen analysiert. Im Detail analysiert wurden die klimapolitischen Maßnahmen:

- Klimasteuer, d. h. eine Steuer auf die CO_2 - und die klimarelevanten Nicht- CO_2 -Emissionen des Luftverkehrs;

- NO_x-Entgelt kombiniert mit einem CO₂-Emissionshandel und einfachen operationellen Maßnahmen („Tiefer Fliegen“) zur Vermeidung von Kondensstreifen und Zirren;
- Emissionshandel für die CO₂- und die klimarelevanten Nicht-CO₂-Emissionen des Luftverkehrs.

Die einzelnen klimarelevanten Gase haben eine unterschiedliche Verweildauer in der Atmosphäre: Während CO₂ eine Lebenszeit von bis zu 100 Jahren aufweist, reicht die Lebenszeit anderer Klimagase von wenigen Stunden (lineare Kondensstreifen) bis hin zu einigen Jahren bzw. Jahrzehnten. Wenn der gesamte Klimaeffekt des Luftverkehrs mit Hilfe eines Instruments reguliert werden soll, müssen die Klimawirkungen der einzelnen Nicht-CO₂-Spezies in Relation zur Klimawirkung von CO₂ gestellt werden. Hierzu wurde im Rahmen von AviClim die Metrik ‚Average Temperatur Response (atr)‘ mit einem Zeithorizont von 20 Jahren (atr 20) sowie alternativ 50 Jahren verwendet (atr 50). Bei einem relativ kurzen Zeithorizont von 20 Jahren werden die Wirkungen der kurzlebigeren Klimagase, wie z. B. NO_x oder Kondensstreifen, stärker berücksichtigt; ein Betrachtungszeitraum von 50 Jahren erlaubt wiederum eine etwas stärkere Gewichtung der langlebigeren Klimagase, insbesondere von CO₂.

3. Wesentliche Ergebnisse

Klimapolitische Maßnahmen entfalten unterschiedliche Wirkungen sowohl hinsichtlich der ökonomischen als auch ökologischen Folgen. Für die Politik ist daher zunächst eine klare Definition des gewünschten Ziels hinsichtlich der zu erreichenden Reduktion der Klimaänderung und einer akzeptablen monetären Belastung des Luftfahrtsektors wichtig.

Die AviClim-Modellierungsergebnisse belegen, dass unter den getroffenen Annahmen das Instrument eines globalen Emissionshandels auf alle klimarelevanten Substanzen mit der Möglichkeit, CO₂-Zertifikate aus anderen Sektoren zu kaufen, den Instrumenten eines NO_x-Entgelts und einer Klimasteuer überlegen ist. Durch ein NO_x-Entgelt werden die NO_x-Emissionen eines Fluges preislich belastet. Zusätzlich werden bei diesem Instrument ein CO₂-Emissionshandel und operationelle Maßnahmen zur Vermeidung von Kondensstreifen und Zirren eingeführt. Durch eine Klimasteuer wiederum werden alle klimarelevanten Emissionen des Luftverkehrs mit einer Steuer belastet.

Die AviClim-Ergebnisse unterstreichen die Erkenntnisse der umweltökonomischen Theorie, die besagen, dass Emissionsrechtsmodelle sowohl zu den volkswirtschaftlich betrachtet geringsten Vermeidungskosten für Emissionen führen als auch die Umsetzung eines bestimmten ökologischen Ziels sicher gewährleisten. Gleichwohl zeigen die Erfahrungen auf internationaler Ebene, dass die Umsetzung dieser Erkenntnisse in die Praxis mit sehr großen Schwierigkeiten behaftet ist. So wurde im Rahmen der 38. Versammlung der Internationalen Zivilluftfahrtorganisation ICAO im Jahr 2013 die Einführung einer marktbasierten Maßnahme (MBM) zur Limitierung der CO₂-Emissionen des internationalen Luftverkehrs bis zum Jahr 2020 (ICAO, 2013) beschlossen. Sowohl Emissionshandelssysteme als auch die zur Zeit intensiv diskutierten Offsetting-Systeme, bei denen Emissionseinsparungen („Offsets“) gehandelt werden, sind hierbei prinzipiell geeignet. Die Verhandlungen zur Einführung eines globalen CO₂-Handelssystems für den Luftverkehr gestalten sich jedoch äußerst langwierig und schwierig.

Gründe für die Vorteilhaftigkeit des Emissionshandels im Rahmen der AviClim-Untersuchung sind einerseits die z. T. deutlich niedrigeren Gesamtkosten sowie relativ geringen Wettbewerbsverzerrungen und Rückgänge der Erwerbstätigenzahlen im Vergleich zu einer Entwicklung ohne klimapolitische Maßnahmen. Andererseits können durch den Emissionshandel signifikante Einsparungen an Klimagasen und positive Klimawirkungen realisiert werden. Beispielsweise könnte die Klimawirkung des Luftverkehrs im Jahr 2100 unter den Annahmen des ‚High Price Scenarios‘ im Szenario „World“ um bis zu 70% im Vergleich zu einer Business-as-usual-Entwicklung reduziert werden. Das ‚High Price Scenario‘ nimmt an, dass die Preise für CO₂-Äquivalente von 10 USD/t CO₂-Äquivalent im Jahr 2010 auf 80 USD/t CO₂-Äquivalent im Jahr 2030 steigen werden.

Hierbei ist zu berücksichtigen, dass diese ökologischen Effekte ganz überwiegend durch Zukäufe von Emissionsrechten von stationären Sektoren, also nicht durch Reduktionsleistungen des Luftverkehrs selbst erzielt werden. Die Zurechnung der Zukäufe zu den Einsparungen an klimarelevanten Emissionen des Luftverkehrs ist dann sachlich geboten, wenn die Nachfrage des Luftverkehrssektors nach Emissionsrechten in anderen Wirtschaftsbereichen Impulse zu zusätzlichen Reduktionsmaßnahmen setzt und damit zu einem zusätzlichen Angebot an diesen Rechten führt. Mit Blick auf die sehr hohen zusätzlichen Vermeidungskosten des Luftverkehrssektors für klimarelevante Emissionen spricht vieles dafür, dass der Luftverkehrssektor höhere Preise für Emissionsrechte zu zahlen bereit sein wird als andere Emittentengruppen. Aufgrund dessen erscheint es plausibel, dass die Zukäufe des Luftverkehrssektors an Emissionsrechten zu zusätzlichen Emissionseinsparungen bei anderen Emittenten führen werden.

Eine weltweite Einführung von klimapolitischen Maßnahmen ist aus ökologischer Sicht am sinnvollsten; eine Beschränkung auf die sog. „Great Aviation Countries“ bzw. „Annex-I-Countries“ hat jedoch fast den gleichen ökologischen Nutzen. Dies liegt daran, dass in diesen geopolitischen Szenarien mehr als 90 Prozent der weltweit durchgeführten Flüge unter das jeweilige klimaschützende Instrument fallen würden. Das im Rahmen von AviClim entworfene geopolitische Szenario „Great Aviation Countries“ nimmt an, dass die wichtigsten Akteure im internationalen Luftverkehr zu den Unterstützerstaaten der jeweiligen klimapolitischen Maßnahme zählen. Hierzu gehören unter anderem: Die EU, die USA, Kanada, Südkorea, Japan, Singapur, China, Brasilien und die Golfstaaten. Im geopolitischen Szenario „Annex-I-Countries“ wird hingegen angenommen, dass alle Annex-I-Staaten plus Brasilien, Russland, Indien und China das jeweilige klimapolitische Instrument einführen werden.

Eine weltweite Einführung führt zu den geringsten Wettbewerbsverzerrungen, ist aber vermutlich politisch schwerer umzusetzen als eine Beschränkung auf „Great Aviation Countries“ oder „Annex-I-Countries“. Vor diesem Hintergrund erscheint es sinnvoll, in einer möglichst großen Zahl von Staaten rasch klimaschützende Maßnahmen im Luftverkehr einzuführen, anstatt auf eine weltweite Lösung zu warten. Aus wettbewerbspolitischer Sicht ist hierbei wichtig, dass die Staaten, aus denen die wichtigsten Fluggesellschaften der Welt stammen, bei einem solchen Ansatz von Anfang an teilnehmen. Andernfalls sind erhebliche Wettbewerbsverzerrungen im Luftverkehrsmarkt zu befürchten.

Prohibitiv hohe Preise pro CO₂-Äquivalent führen bei einer überproportional zurückgehenden Nachfrage nahezu zu einem Zusammenbruch des Luftverkehrs und damit zum Wegfall seiner positiven gesellschaftlichen und ökonomischen Effekte. Dies haben die AviClim-Modellierungsergebnisse belegt. Insbesondere die Kombination der Metrik atr 20, die die Temperaturänderung über einen Zeithorizont von 20 Jahren abschätzt, hoher Preise für CO₂-Äquivalente (z. B. 80 USD pro Tonne CO₂-Äquivalent im Jahr 2030) und einer angenommenen sehr deutlichen Nachfragerreaktion (Preiselastizität von -2,1), die zu einer überproportional zurückgehenden Luftverkehrsnachfrage führt, wirkt sich sehr ungünstig auf die Umsätze, die Beschäftigung und die Luftverkehrsentwicklung aus. So würde unter diesen Annahmen die Beschäftigung (direkte und indirekte Effekte) im Weltluftverkehr von knapp 8 Millionen Beschäftigten in der Business-as-usual-Entwicklung im Jahr 2030 auf nur noch 359.000 Beschäftigte zurückgehen. Unter der Annahme der Metrik atr 50, die die Temperaturänderung für einen Zeithorizont von 50 Jahren abschätzt, und von niedrigeren Preisen für CO₂-Äquivalente ist dies nicht der Fall. Hier ist die Politik aufgefordert, durch die Setzung von Rahmenbedingungen eine sowohl aus ökologischer

als auch aus ökonomischer und sozialer Sicht nachhaltige Entwicklung im Luftverkehr zu gewährleisten.

Extended Abstract

1. Background and Objective of Research

International aviation is a substantial emitter of CO₂ and, additionally contributes to climate change by non-CO₂ effects, such as emission of NO_x or triggering contrails and contrail cirrus (e.g., Sausen et al., 2005): In 2005, aircraft-induced CO₂ contributed 1.6% to the total anthropogenic radiative forcing (RF). If non-CO₂ climate effects are also considered, the contribution of aviation to total anthropogenic RF is about three times as large, i.e., 4.9% (Lee et al., 2009). In addition, international aviation is one of a few sectors expected to grow significantly in the medium and long term. Whilst international aviation's carbon dioxide emissions have been regulated in a number of countries by market-based measures (Scheelhaase, 2014), this is not the case for most of aviation's non-CO₂ climate impacts. Especially the effects of aviation-induced clouds and NO_x emissions on high altitudes are not investigated with regard to the possible introduction of regulatory measures at this point.

To complicate matters, the international character of aviation renders national approaches ineffective and requires lengthy political negotiations on the international level. Here, both the International Civil Aviation Organisation (ICAO), as well as any supranational/international political institution of great regional importance such as the European Commission will have to be involved. With regard to expected future annual growth rates of 3 – 7 per cent, depending on the world region (Airbus, 2011), the implementation of global or at least internationally coordinated instruments for the reduction of the non-CO₂ impact of international aviation on climate change seems to be necessary expeditiously.

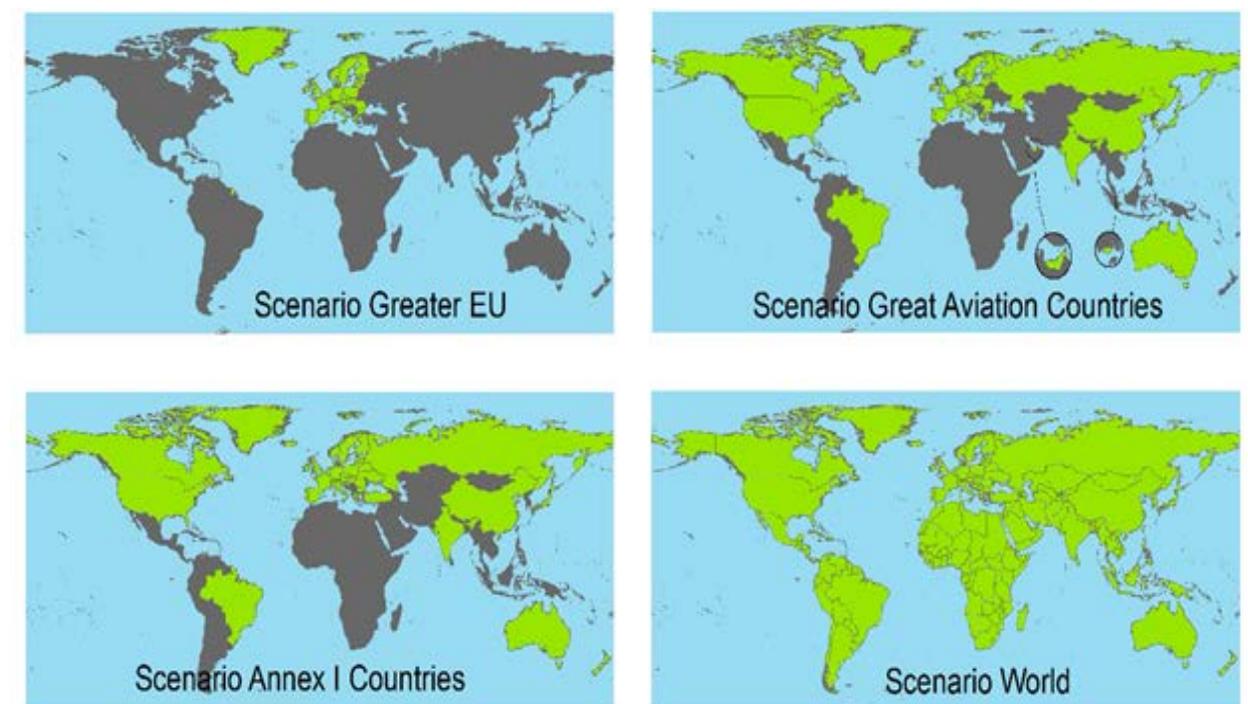
The overall goal of DLR's research project AviClim is to explore the feasibility for including aviation's CO₂ and non-CO₂ climate impacts in international protocols for climate protection and to study the associated economic consequences. The interdisciplinary research project AviClim is funded by the German Federal Ministry of Education and Research.

2. Methodological Approach

In this research project, four reduction scenarios have been designed which differ concerning the level of international support for climate protecting measures in aviation. Picture 1 visualizes

the scenarios assumed. Each of these scenarios will be compared with a Business-as-usual-Scenario which assumes a continuation of the current environmental policies.

Picture 1: Scenarios investigated in research project AviClim.



The four reduction scenarios have been combined with selected market-based measures for the reduction of aviation's climate relevant emissions. Market-based measures analysed include:

- an emissions trading scheme for regulating all climate relevant emissions from aviation,
- a climate tax and
- a NO_x emission charge combined with a CO₂ trading scheme and operational measures (50% of flights operated between 30 and 60°N and on an altitude between 9 and 12 km will be flying 2000ft lower to avoid contrails).

The cost and competition impacts of these political measures as well as the impacts on employment have been estimated by employing economic simulation models. The environmental and climate effects have been investigated by DLR-developed metrics and models, see Schaefer (2012) and Dahlmann (2012) for details.

Aviation's non-CO₂ effects depend on flight altitude, geographical location, day time, weather situation etc. (e.g.; Fichter et al., 2005; Mannstein et al., 2005; Fichter, 2009). In addition, the different climate agents (e.g. CO₂, ozone, methane, contrail cirrus) act on very different time

scales. While e.g. contrail cirrus have a large impact shortly after the emission, but a fast decrease in time, CO₂ has a low impact at the beginning, but occurs over a longer time period. Currently, the science community discusses how to weigh short-lived non-CO₂ effects (e.g., Fuglestvedt et al., 2010). As of December 2014, no consensus has been reached on the most appropriate metric. But the choice of this metric is not arbitrary, it should be followed from the application it is used for. Due to the different life-times in the atmosphere, the climate impact of aviation's non-CO₂ effects is not proportional to the CO₂ emissions. Therefore, accounting aviation's non-CO₂ effects by simply applying a factor to the CO₂ emissions is not appropriate as it would provide incorrect incentives.

Against this background, two different metrics for quantifying aviation's full climate impact have been assumed alternatively: Average Temperature Response over 20 years 'atr 20' and over 50 years 'atr 50'. The Average Temperature Response 'atr' is the mean change in near surface temperature averaged over 20 and 50 years, respectively. The metrics atr 20 weighs the effect of short-lived climate agents like ozone and contrail cirrus stronger than CO₂, as they show a large effect at the beginning of the time period analysed but a fast decrease in time, while CO₂ has a low impact at the beginning, but occurs over a longer time period.

As the future development of prices for CO₂ equivalent is difficult to foresee, three different price development paths have been assumed: (1) A 'High Price Path' and a (2) 'Low Price Path' with a price range of USD 10 per ton CO₂ equivalent in the year 2010 (both Price Paths) to USD 80 in the year 2030 (High Price Path) and to USD 30 per ton in the year 2030, respectively (Low Price Path). (3) The 'Mixed Price Path' assumes low CO₂ equivalent prices for both trading schemes (trading of all climate relevant species and CO₂ trading) and high prices for the climate tax and the NO_x charge. This way, the likely advantage of trading schemes which becomes manifest in lower emission prices (as compared to taxes and charges) can be shown more explicitly.

The costs for the market-based measures will lead to a production cost increase of the airlines regulated. Under the assumption that the airlines will try to pass-on the full cost increase to their customers, and will therefore act as profit maximizers, prices for air services will increase. How will demand for air services react to this price increase? In general, this demand reaction depends on the price elasticities of demand. As empirical data of the price elasticities of demand for air services shows a broad range of possible figures (Oum et al., 1990; Oum et al., 1992; Lu, 2009), three cases of price elasticities have been analysed alternatively:

- Case 1: Demand for air services reacts inelastic. In this case, the quantitative demand for air services remains unchanged.
- Case 2: Demand for air services reacts elastic by a quantitative reduction of demand. In case 2, the quantitative demand reaction is under proportionate to the price increase by the airlines. Here, a price elasticity of -0.8 has been assumed, i.e. 1% price increase leads to a 0.8% decrease in demand.
- Case 3: Demand for air services reacts elastic by a reduction of demand. Different to case 2, the quantitative demand reaction is disproportionate to the price increase by the airlines. In case 3 a price elasticity of -2.1 has been assumed, i.e. 1% price increase leads to a 2.1% decrease in demand.

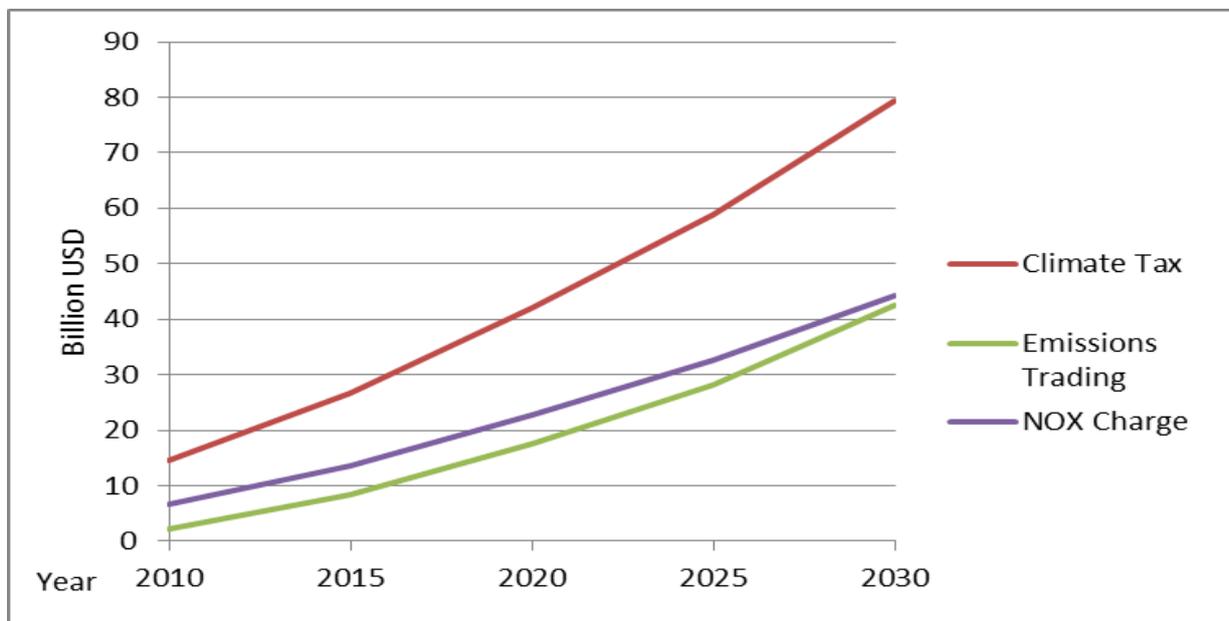
This way, the complete range of possible demand side reactions can be analysed. In practice, we believe, case 2 may be the most likely reaction. The demand reaction according to the cases 2 and 3 will have effects on the development of revenues of the airlines addressed by the climate protecting measure. In a next step, the airlines will change their flight plans (supply side effect) according to the change in demand. Implicitly, equality of demand and supply has been assumed here which is plausible after a certain adaption period. This will have impacts on the development of air traffic in the scenarios investigated. If air traffic will decrease, a reduction in fuel used, climate relevant emissions from aviation and a reduced climate impact can be expected compared to a business-as-usual development.

3. Main Results

The following graphs and explanations provide an overview of AviClim main results in detail. As picture 2 illustrates, total costs for market-based measures regulating aviation's full climate impact will be the highest for a climate tax. In Scenario "Greater EU", which assumes a political support for these climate protecting measures in the European Union plus Norway, Iceland and Liechtenstein, under the assumption of a moderate price development for CO₂ equivalent allowances (Low Price Path) and of the metrics atr 20, total costs for the airlines will add up to USD 79.3 billion in 2030 at the most. In contrast, both an emissions trading scheme for all climate relevant emissions (green line) and a NO_x charge combined with CO₂ trading and operational measures (purple line) will lead to much lower overall costs: Total costs for an emissions trading scheme would amount up to USD 42.5 billion in the year 2030 and a NO_x charge combined with CO₂ trading and operational measures would add up to total costs of about USD 44 billion for all airlines addressed by the regulating measure.

In the scenario “World” (only shown in the full report), total costs for the three market-based measures investigated here are much higher because in this scenario all airlines would be subject to the climate protecting measure under consideration. If the climate protecting measures were supported on a global level, total costs for a climate tax would add up to a good USD 688 billion in the year 2030 under the assumption of a high CO₂ equivalent price development path and the metrics atr 20. Again, total costs for an emissions trading scheme as well as for a NO_x charge combined with a CO₂ trading scheme and operational measures would be significantly lower: Under these assumptions, total costs for all airlines would amount up to about USD 401 billion (emissions trading) and USD 339 billion (NO_x charge) in the year 2030.

Picture 2: Costs of market-based measures analysed in Scenario “Greater EU”, Low CO₂ Equivalent Price Path, Metric atr 20.

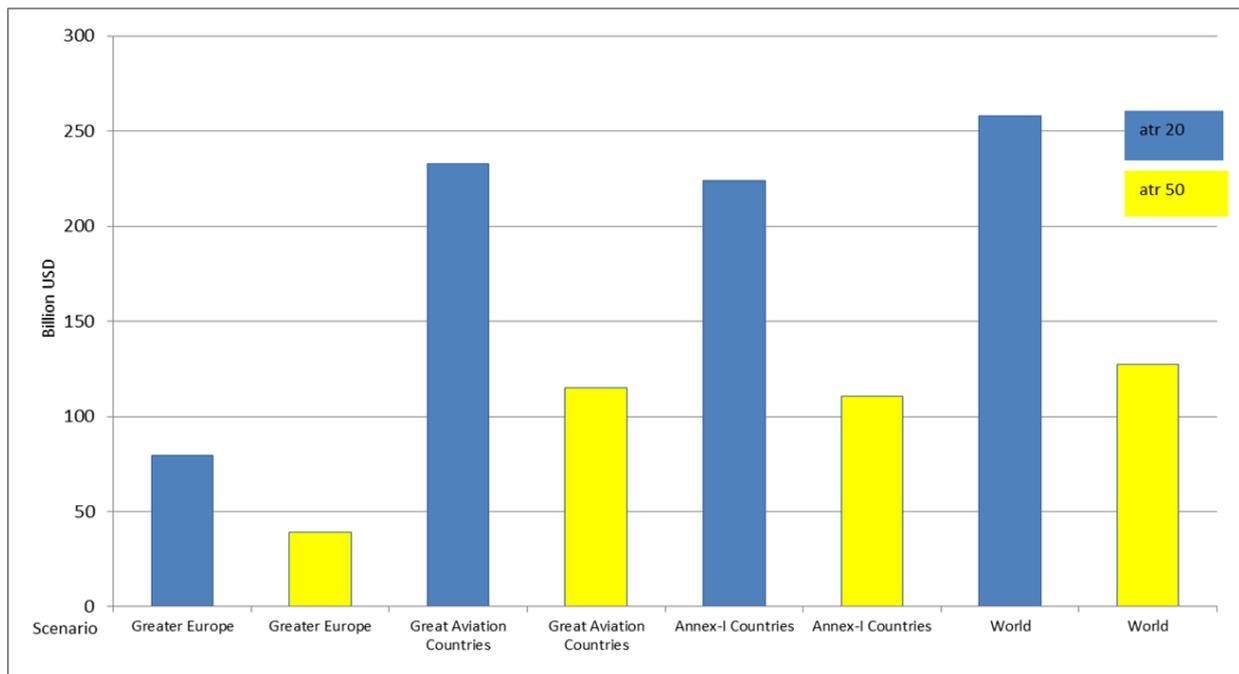


Source: DLR. In 2012 prices.

Picture 3 shows the great influence of the metrics chosen on the results. In this picture, the total costs for the climate tax in the year 2030 for the four scenarios investigated are presented. Here, a moderate CO₂ equivalent price development (Low Price Path) has been assumed. Results for the metrics atr 20 are marked in blue, results for atr 50 are marked in yellow. Obviously, the metrics atr 20 leads to much higher costs than the metrics atr 50. This is because the metrics atr 20 weighs the effect of short-lived climate agents like ozone and contrail cirrus stronger than CO₂, as they show a large effect at the beginning of the time period analysed but a fast decrease in time, while CO₂ has a low impact at the beginning, but occurs over a longer time period. As atr 20 averages the temperature change of the first 20 years, the impact of short-lived

climate agents is higher compared to that of CO₂ for atr 20 than for atr 50. If the resulting different total amounts of CO₂ equivalent are multiplied by the (same) prices for CO₂ equivalent, total costs for the climate tax will differ accordingly, as can be seen in picture 3.

Picture 3: Influence of metrics assumed on costs for climate tax in the year 2030 in different scenarios, Low CO₂ Equivalent Price Path, Metric atr 20 versus Metric atr 50.



Source: DLR. In 2012 prices.

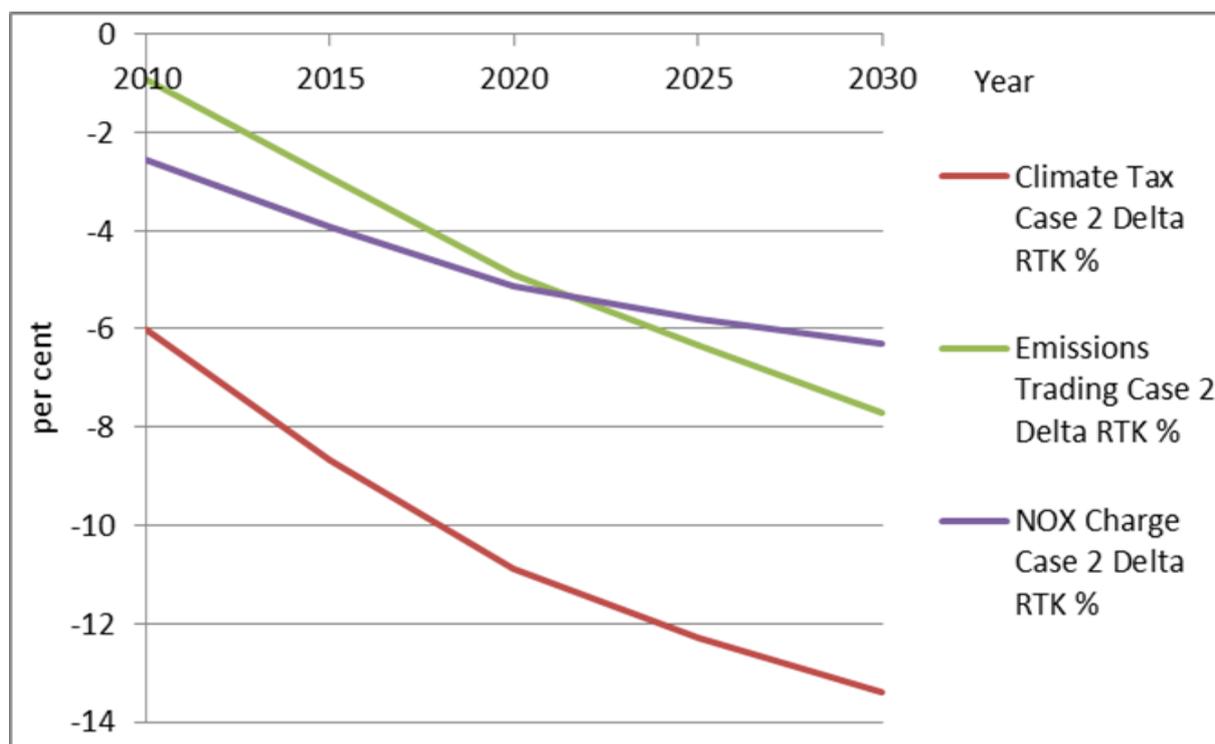
As explained above, the costs for the market-based measures presented will raise the production costs of the airlines regulated. Under the assumption that the airlines will act as profit maximizers, prices for air services will increase.

The demand reaction according to the price elasticity cases 2 and 3 will affect the revenues of the airlines addressed by the climate protecting measure and their flight plans (supply side effect). This will affect the development of air traffic in the scenarios investigated. Picture 4 shows the development of air traffic in the scenario "Great Aviation Countries" for the metrics atr 20 and for the Low Price Path. Here, a demand reaction according to case 2 has been assumed.

Picture 4 illustrates that air traffic will be affected by the three market-based measures analysed in the range of minus 1 to 14 per cent of RTKs (Revenue Ton Kilometre) in the timeframe 2010 - 2030. Again, effects of the climate tax are the greatest while the impacts of the emissions trad-

ing scheme for all climate relevant emissions and the effects of the NO_x charge combined with CO₂ trading and operational measures are lower by far.

Picture 4: Development of air traffic, Scenario "Great Aviation Countries", Metric atr 20, Low CO₂ Equivalent Price Path, Case 2 demand reaction, in per cent compared to Business-as-usual Scenario.



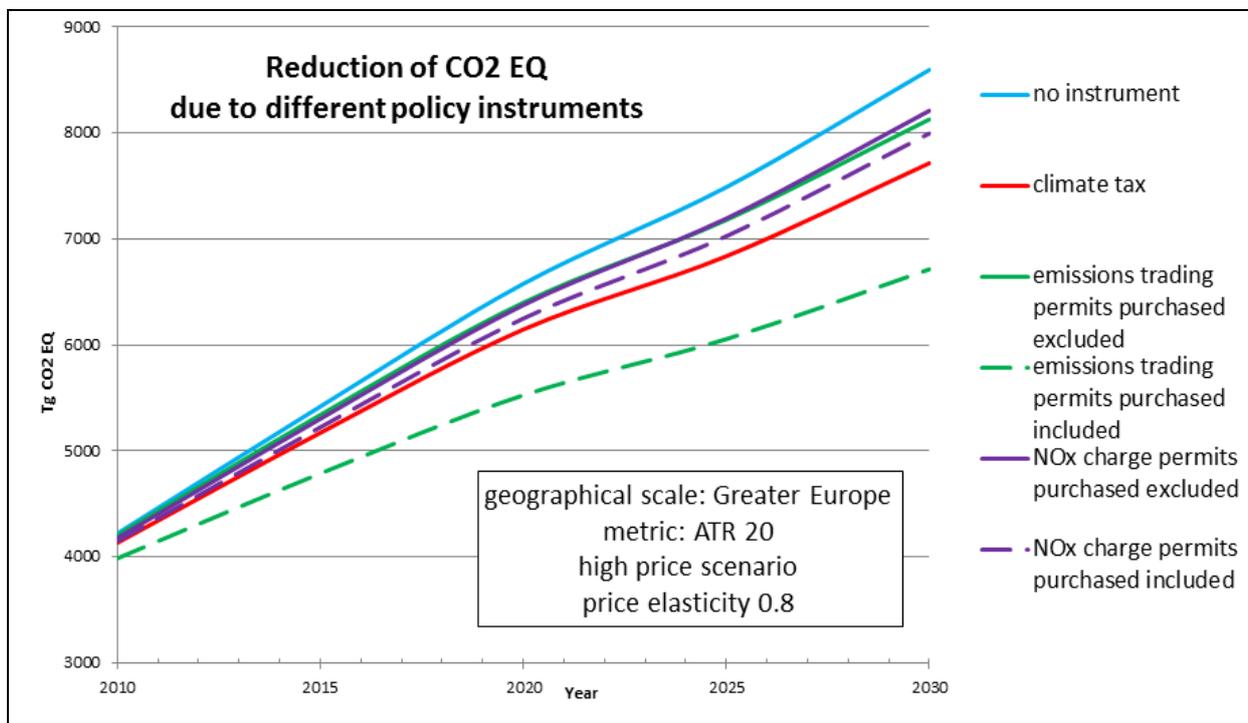
Source: DLR.

This reduction in air traffic leads to a reduction of climate relevant emissions from aviation since less fuel will be used by the sector (see table 1). For the Low Price Path, the reduction in fuel consumption is between 0.6 (NO_x charge, Greater EU) and 6.7% (Climate Tax, World). For the two market-based measures analysed which include emissions trading, additional environmental benefits are derived from the necessary purchase of CO₂ allowances from other sectors (picture 5). This is because under an emissions trading scheme, the airlines have to purchase emission allowances from other sectors (such as stationary energy plants or energy-intensive industries) in order to comply with the regulation scheme.

Table 1: Change in fuel consumption in comparison to BaU scenario for the year 2030 and Metric atr 50 for Case 2 demand reaction

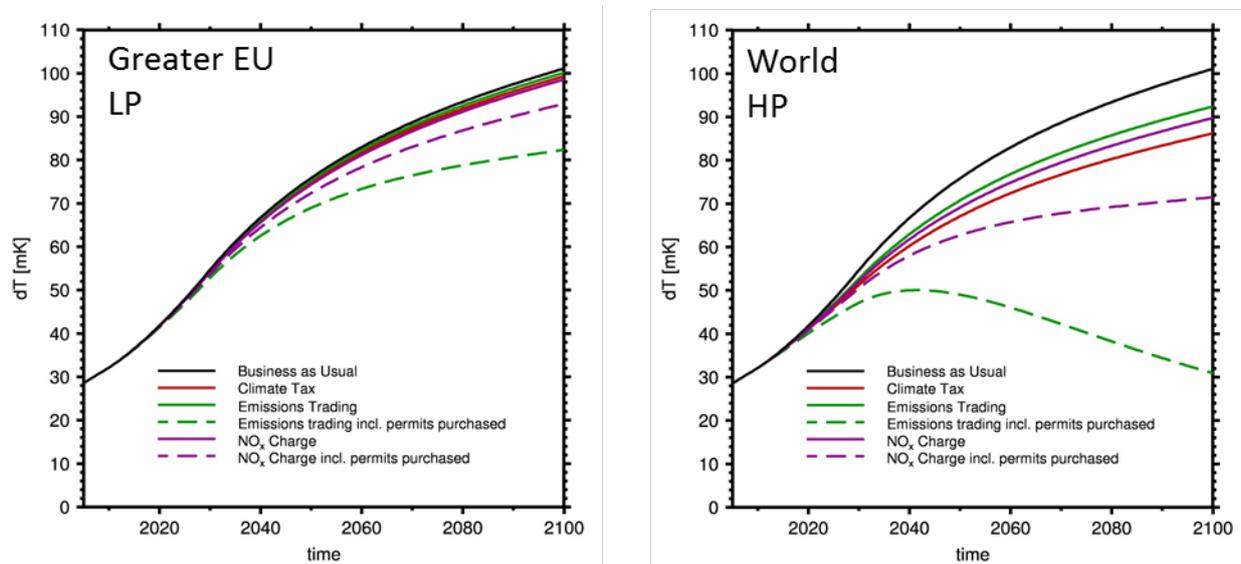
LP	Greater EU	Great Aviation Countries	World
Climate Tax	-1,8%	-5,9%	-6,7%
Emission Trading	-0,9%	-3,4%	-3,9%
NO _x charge	-0,6%	-1,9%	-2,2%
HP	Greater EU	Great Aviation Countries	World
Climate Tax	-5,1%	-15,8%	-17,8%
Emission Trading	-2,7%	-9,2%	-10,4%
NO _x charge	-2,4%	-6,5%	-7,4%

Picture 5: Climate impact in terms of CO₂ equivalents for different marked-based measures including permit purchases for the scenario "Greater EU", Metric atr 20, Case 2 demand reaction.



Source: DLR.

Picture 6: Temporal development of temperature change for the scenario "Greater EU" combined with low price path and scenario "World" combined with high price path compared to BaU scenario, Metric atr 50, Case 2 demand reaction



Source: DLR.

The change in the temporal development of climate impact in terms of temperature change is presented in picture 6 for the two extreme cases: scenario "Greater EU" and Low Price Path and scenario "World" combined with High Price Path. For the scenario "Greater EU" without taking the possibility to buy permits from other sectors into account, only small impacts on the temperature change can be found, as only a small part of global aviation is influenced by this scenario. If purchases of permits are taken into consideration, the temperature change in the year 2100 will be reduced by about 18% for the marked-based measure emissions trading. If the whole world is supporting this climate political measure, the temperature change will be reduced by 15% compared to the BaU scenario without purchases. If purchases are taken into account, the temperature change is reduced by up to 70% in the year 2100. Due to the fact that for emissions trading the amount of purchases from other sectors is larger than the CO₂ emission from aviation, the temperature change decreases after 2040 despite constant aviation emission after 2030. The increasing temperature change after 2030 for all other scenarios is due to the thermal inertia of the atmosphere and due to the fact that CO₂ has a very long lifetime and accumulates in the atmosphere. Overall, AviClim results show that environmental benefits are the greatest for the emissions trading scheme for all climate relevant emissions from aviation.

4. Conclusion and Outreach

All in all, AviClim results have improved the general understanding and knowledge on how to proceed strategically best both on a national as well as on an international political level in order to reduce the total impact of aviation on climate change. AviClim provides insights on the economic and environmental impact, the economic efficiency and the consistency of the selected market-based and operational measures for the reduction of the non-CO₂ impact of aviation.

In particular, our results indicate that a global emissions trading scheme for the political regulation of both CO₂ and non-CO₂ emissions of aviation under the assumptions explained above would be the best solution from an economic and environmental point of view. Costs and impacts on competition could be minimized. At the same time, environmental benefits are significant. For instance, under the assumption of the 'High Price Path' the temperature change induced by aviation could be reduced by up to 70 % in the year 2100 compared to the Business-as-usual development.

As modelling results for the geopolitical scenarios "Great Aviation Countries" and "Annex-I Countries" have shown, the environmental and climate protecting benefits gained here are almost at the level of a global solution. This is because in these geopolitical scenarios more than 90 per cent of the global flights would be regulated by the climate protecting measure under consideration. Depending on the actual national and international support for climate protecting measures, a political solution for the "Great Aviation Countries" or the "Annex-I Countries" could possibly be easier to find than for a global scheme. This leads to the conclusion that it would be advantageous to get started soon with a limited number of countries supporting climate protecting measures in aviation than to wait for a worldwide agreement. To minimize competitive distortions, the countries of origin of the main players in aviation should be included from the beginning.

The second best solution from an instrumental point of view would be the combination of a NO_x charge with CO₂ trading and (simple) operational measures. These political measures will allow for environmental and climate protecting benefits just below the benefits gained by the emissions trading scheme for all climate relevant species from aviation as AviClim modelling results have demonstrated. A possible disadvantage of such a combination of market-based and operational measures could be higher transaction costs on the governmental as well as on the

airlines level. This is due to the fact that it will be more complicated to implement, handle and monitor three different regulatory approaches than one single solution.

On the basis of the 38th ICAO Assembly Resolution (International Civil Aviation Organisation, 2013) the discussion on ICAO level currently concentrates on the design of offsetting schemes for the limitation of international aviation's CO₂ emissions. Offsetting is a variant of emissions trading with some differences to the emissions trading scheme analysed within AviClim. As mentioned above, the implementation of such an offsetting scheme is envisaged for the year 2020. It remains to be seen if ICAO will be successful within this timeframe as discussions are difficult as it is the case with many UN agencies and institutions. If ICAO negotiations will succeed, AviClim results could be used to expand the CO₂ scheme to the non CO₂ climate relevant species from aviation as a next step. Here, both the extension of the CO₂ offsetting scheme to other climate relevant species and/or the introduction of operational measures such as climate optimal flight trajectories could be worthwhile considering.

1 Hintergrund, Problemstellung und Herangehensweise

Der globale Luftverkehr ist ein kontinuierlich wachsender Wirtschaftssektor. Gleichzeitig trägt der Luftverkehr zum anthropogenen Klimawandel bei. Zu den klimarelevanten Emissionen gehören neben Kohlendioxid auch Stickoxide, Schwefeloxide, Wasserdampf, Ruß, Kondensstreifen und Zirren. Seit dem Jahr 1990 ist ein kontinuierlicher Anstieg der verkehrsbedingten Kohlendioxid- (CO_2) und anderen klimarelevanten Emissionen wie Stick- (NO_x) und Schwefeloxide (SO_x), Wasserdampf (H_2O), Ruß, Kondensstreifen und Zirren zu verzeichnen (Sausen et al., 2005). Im Jahre 2005 trugen die weltweiten CO_2 -Emissionen des Luftverkehrs zu etwa 1,6 % zum gesamten Strahlungsantrieb bei. Berücksichtigt man zusätzlich die übrigen Klimaeffekte des Luftverkehrs, lag dieser Wert mit etwa 4,9 % sogar dreimal so hoch (Lee et al., 2009).

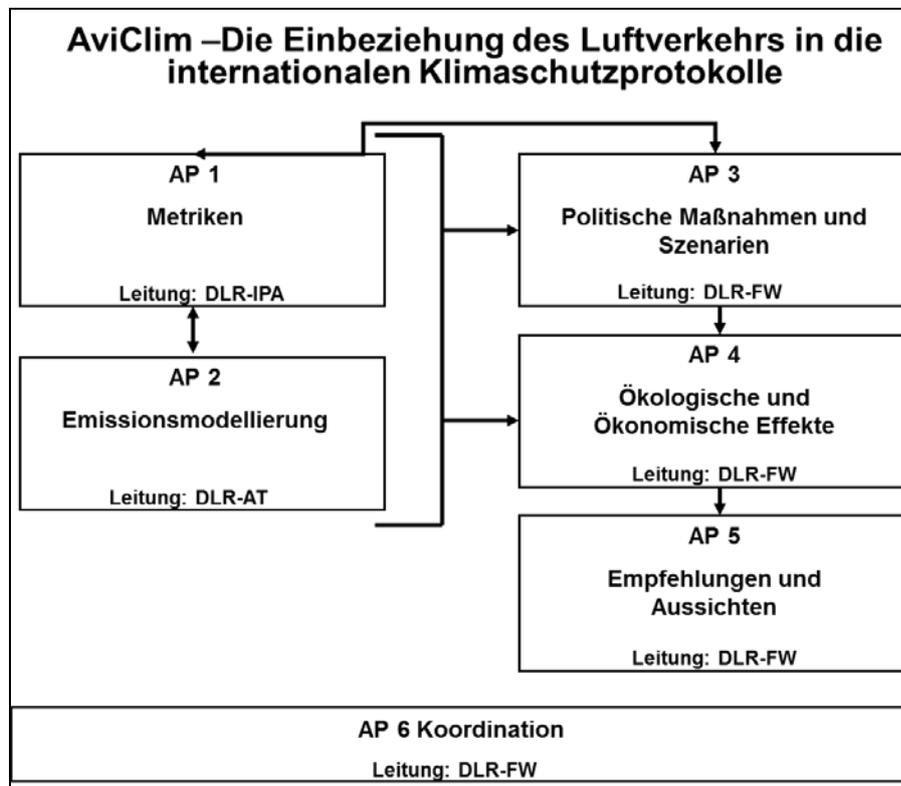
In Anbetracht des für die kommenden Jahre erwarteten kontinuierlichen Wachstums des Luftverkehrs in Höhe von 3 bis 6 % p. a. (vgl. hierzu z. B. Airbus, 2011), erscheint es dringend erforderlich, Maßnahmen zur Begrenzung der gesamten klimarelevanten Emissionen des Luftverkehrs zu ergreifen. Hierbei stellen sich insbesondere drei Herausforderungen: Zum einen sind einige Effekte der klimarelevanten Nicht- CO_2 -Emissionen des Luftverkehrs aus naturwissenschaftlicher Sicht noch nicht abschließend erforscht. Auch wurde bei der vom Luftverkehr induzierten Bewölkung sowie bei den Wirkungen von NO_x in großen Höhen noch nicht untersucht, wie sich regulatorische Maßnahmen hierauf auswirken. Zum anderen ist der Vergleich der Klimawirkung verschiedener Spurenstoffe durch deren unterschiedlichen Charakteristika erschwert. Zudem ist aufgrund des internationalen Charakters des Luftverkehrs eine globale Reduzierung dieser Emissionen erforderlich. Hier stellt sich die Frage, wie die weltweite Regulierung dieser Emissionen politisch gelingen kann und welche ökonomischen Effekte damit verbunden sind.

Bereits heute bzw. in absehbarer Zukunft werden die CO_2 -Emissionen des Luftverkehrs in einigen Ländern der Welt, beispielsweise der EU, politisch reguliert (siehe hierzu Scheelhaase, 2011). Insbesondere sogenannte marktwirtschaftliche Instrumente wie der Emissionshandel kommen hier zum Einsatz. Jedoch bewirkt vor allem der internationale Charakter des Luftverkehrs, dass nationale Ansätze relativ ineffektiv sind. Zudem zeichnen sich weltweit sehr heterogene Regulierungsansätze ab, was zu Wettbewerbsverzerrungen führen dürfte. Hingegen erfordern global einheitliche Lösungen aufwändige politische Verhandlungen auf der internationalen Ebene. Hier müssen sowohl die Internationale Zivilluftfahrtorganisation (ICAO) und das Sekretariat der UN-Klimarahmenkonvention (UNFCCC) als auch etwaige supranationale Institutionen wie die EU einbezogen werden. Angesichts der drängenden ökologischen Probleme erscheint eine baldige

politische Regulierung auch der übrigen klimarelevanten Emissionen des Luftverkehrs dringend geboten.

Das vom Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) geförderte Projekt „AviClim“ („Including Aviation in International Protocols for Climate Protection“) untersucht die Machbarkeit der Einbeziehung aller klimarelevanten Emissionen des Luftverkehrs in internationale Klimaschutzprotokolle und die damit verbundenen ökonomischen Effekte. Im Rahmen von AviClim sind 6 interagierende Arbeitsschritte vorgesehen, die in der nachfolgenden Abbildung gezeigt werden. Hiermit wird ein Abschlussbericht vorgelegt, der die Ergebnisse des Forschungsprojektes zusammenfasst.

Abbildung 1-1: AviClim Arbeitspakete



Quelle: Eigene Darstellung.

2 Metriken zur Abschätzung der Klimawirkungen

Soll der schädliche Einfluss des Luftverkehrs auf das Klima reduziert werden, ist es zunächst nötig eine Maßzahl, oder auch Metrik genannt, für den Vergleich verschiedener Luftverkehrsszenarien zur Verfügung zu haben, um eine erfolgversprechende Reduzierung der Klimawirkung zu identifizieren. Dies ist vor allem beim Luftverkehr eine Herausforderung, da sich die Klimawirkung des Luftverkehrs aus der Wirkung einer Reihe von Spurenstoffen zusammensetzt, die teilweise in unterschiedlicher Weise auf die Strahlungsbilanz der Atmosphäre wirken und sehr unterschiedlich lange Lebenszeiten aufweisen, wodurch sie nicht direkt in ihrer Wirkung verglichen werden können.

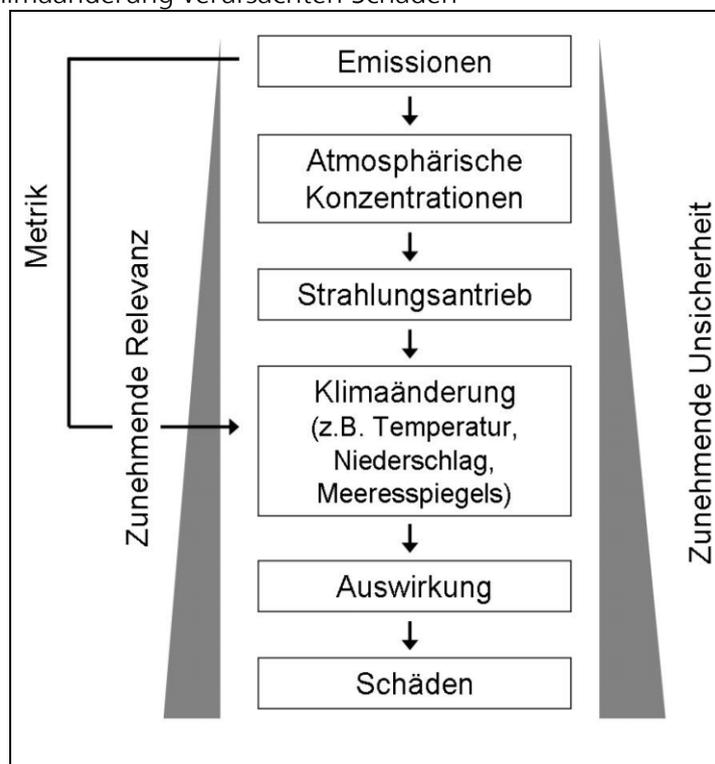
So wirken zum Beispiel CO_2 und H_2O direkt als Treibhausgas und führen damit zu einer Erwärmung der Atmosphäre. Die Emission von Stickoxiden (NO_x) wirkt hingegen nicht direkt als Treibhausgas, sondern verändert die chemische Zusammensetzung der Atmosphäre. So führt die Emission von NO_x zu einer Erhöhung der Ozonkonzentration und einer Verringerung der Methankonzentration. Während die Erhöhung der Ozonkonzentration zur Erwärmung der Atmosphäre führt, verursacht die Reduzierung des Treibhausgases Methan eine Abkühlung der Atmosphäre. Zusätzlich führen die Flugzeugemissionen je nach atmosphärischen Bedingungen zur Bildung von Kondensstreifen und diese teilweise zur Bildung von sogenanntem Kondensstreifen-Zirrus. Diese haben sowohl einen wärmenden als auch kühlenden Effekt auf das Klima, wobei der wärmende Effekt im Mittel überwiegt. Die Lebenszeit der einzelnen klimawirksamen Spurenstoffe reicht von wenigen Stunden (Kondensstreifen) bis zu mehr als 80 Jahren (CO_2).

Durch die sehr unterschiedlichen Charakteristika ist ein eindeutiger Vergleich der Klimawirkung unterschiedlicher Emissionen nicht möglich. Zur Bewertung verschiedener Maßnahmen zur Klimaoptimierung des Luftverkehrs ist es deshalb notwendig, eine Metrik für den Vergleich zur Verfügung zu haben. Dabei stellt eine Metrik den direkten Zusammenhang zwischen der Emission und der zu betrachtenden Klimawirkung (z. B. Strahlungsantrieb, Temperaturänderung oder Schaden) dar (Abb. 3-1). In diesem Kapitel werden zunächst grundlegende Überlegungen zur Verwendung von Metriken angestellt und anhand unterschiedlicher Fragestellungen gezeigt, welche Metriken für die Beantwortung verschiedener Fragestellungen verwendet werden können.

2.1 Anforderungen bei der Wahl von Metriken

Eine der Hauptanforderungen bei der Wahl der Metrik ist, dass die Metrik möglichst nah am Klimaaspekt ist, der für die Fragestellung zugrunde liegt. Bei der Optimierung der Klimawirkung geht es vor allem darum, die ökologischen und sozioökonomischen Schäden einer Klimaänderung zu minimieren. Ein relevantes Maß für die Bewertung der Klimawirkung wäre somit der verursachte Schaden. Allerdings kann dieser nur mit einer relativ großen Unsicherheit beziffert werden, da die Monetarisierung dieser Schäden nach heutigem Stand der Forschung eine sehr große Bandbreite aufweist. Mit einer deutlich geringeren Unsicherheit können hingegen die Emissionen berechnet werden. Diese wiederum sind weniger relevant für die Abschätzung des Schadens, da alle Emissionen erst über ihre atmosphärische Konzentrationsänderung, dessen Strahlungsantrieb und die daraus resultierende Temperaturänderung auf das Klima wirken und damit den Schaden verursachen. Dieser Zusammenhang, also die Zunahme der Relevanz der Metrik und die gleichzeitige Zunahme der Unsicherheit je weiter man in der Wirkungskette nach unten geht, ist in Abbildung 2-1 dargestellt. Bei der Auswahl einer Metrik muss deshalb ein Kompromiss zwischen der Relevanz der Metrik und der mit ihr verbundenen Unsicherheit getroffen werden (Fuglestad et al., 2003).

Abbildung 2-1: Schematische Darstellung der Wirkungskette von den Emissionen bis zu den durch die Klimaänderung verursachten Schäden



Quelle: Eigene Darstellung nach Fuglestad et al., 2003.

Eine weitere Herausforderung für den Vergleich der Wirkungen von Emissionen sind die deutlich unterschiedlichen Lebenszeiten. Während Kohlendioxid über ein Jahrhundert in der Atmosphäre verbleibt, haben linienförmige Kondensstreifen eine Lebenszeit von nur wenigen Stunden (Schumann, 1996). Wird nur eine Emission in einem Jahr, eine sogenannte Pulsemission, betrachtet, so ist die Wirkung von Ozon und Kondensstreifen-Zirrus im Jahr der Emission sehr groß, verschwindet aber bereits nach kurzer Zeit. Die Wirkung von Kohlendioxid hingegen ist im ersten Jahr relativ gering, wirkt aber durch die lange Lebenszeit auch noch nach 80 Jahren. Wird der Zeitpunkt oder die Zeitdauer über die die Klimawirkung betrachtet wird (Zeithorizont H) sehr kurz gewählt, wird die Gewichtung daher stark auf kurzlebige Spurenstoffe gesetzt. Wird der Zeithorizont hingegen sehr lang gewählt, liegt vor allem bei Pulsemissionen die Gewichtung stark auf den langlebigen Spurenstoffen. Der Zeithorizont stellt dadurch eine Gewichtung zwischen lang- und kurzlebigen Spurenstoffen dar und hat einen starken Einfluss auf das Ergebnis. Durch die unterschiedlichen Lebenszeiten weisen die unterschiedlichen Emissionen auch deutlich unterschiedliche geografische Verteilungen auf. So wirkt zum Beispiel Kohlendioxid durch die lange Lebenszeit global, während linienförmige Kondensstreifen durch die geringe Lebenszeit den Strahlungsantrieb nur regional in der Nähe des Emissionsortes beeinflussen.

Durch die sehr unterschiedlichen Charakteristika ist der Vergleich der Klimawirkung verschiedener Spurenstoffe ähnlich dem Vergleich von Äpfel und Birnen. Im Prinzip können verschiedene Methoden verwendet werden um beides zu vergleichen, es gibt aber keine eindeutig richtige Methode. Je nach Fragestellung können verschiedene Metriken angewendet werden (Tol et al., 2008). Für den Spediteur wird zum Beispiel das Gewicht oder das Volumen der Äpfel und Birnen die entscheidende Metrik sein, während der Händler den Vergleich des Gewinns vorziehen würde. Diese einfachen Beispiele zeigen bereits, dass viele Metriken mit zum Teil unterschiedlichen Ergebnissen existieren, aber nicht jede Metrik für alle Fragestellungen sinnvoll ist. Das Gleiche gilt für Metriken zum Vergleich der Klimawirkung verschiedener Spurenstoffe. Zuerst müssen eine Fragestellung und der Anwendungsbereich festgelegt werden und dann kann entschieden werden, welcher Emissionsverlauf und welche Metrik für diese Fragestellung am geeignetsten ist (Fuglestedt et al., 2010).

2.2 Welche Metriken gibt es?

In der Literatur finden sich eine Reihe von Übersichtsartikeln zu Metriken, Anforderungen und deren Eignung (z. B. O'Neill, 2000; Shine et al., 2005; Fuglestedt et al., 2010). Im Folgenden

wird ein kurzer Überblick über einige der am häufigsten verwendeten Metriken gegeben und ihre Vor- und Nachteile werden diskutiert.

Radiative Forcing (RF) und Radiative Forcing Index (RFI)

Die am häufigsten benutzte Metrik ist der Strahlungsantrieb (Radiative Forcing, RF, z. B. Hansen et al., 1981; Ramanathan, 1987), der erstmals von Houghton et al. (1990) als Metrik vorgeschlagen wurde. Der Strahlungsantrieb ist nach Ramaswamy et al. (2001) definiert als die Änderung in der Nettostrahlung (einfallende minus ausfallende, lang- und kurzwellig) an der Tropopause, nachdem sich die Stratosphärentemperatur an das neue Strahlungsgleichgewicht angepasst hat, aber die Boden- und die Troposphärentemperatur sowie die Lage der Tropopause unverändert zum ungestörten Wert bleiben. Der Strahlungsantrieb, also die Änderung der Strahlungsbilanz, hat über $\Delta T = \lambda \cdot RF$ (3.1) einen direkten Einfluss auf die Änderung der bodennahen Gleichgewichtstemperatur (ΔT). Dabei ist λ ein Klimasensitivitätsparameter, der angibt, wie stark das Klima auf eine normierte Störung in der Strahlungsbilanz reagiert. Allerdings kann λ für unterschiedliche Spurenstoffe unterschiedlich groß sein (Joshi et al., 2003; Hansen et al., 2005), wodurch beim Vergleich verschiedener Szenarien kein direkter Bezug mehr zur Temperaturänderung besteht. Dadurch wird die Klimawirkung von Spurenstoffen mit geringerer Klimasensitivität (z.B. Kondensstreifen), bei der Verwendung des Strahlungsantriebes als Metrik, überschätzt (Forster et al., 2006).

Der Strahlungsantrieb ist als physikalische Metrik vielseitig einsetzbar und wird sowohl zum Vergleich verschiedener Spurenstoffe (z. B. Lee et al., 2009) als auch zum Vergleich verschiedener Sektoren eingesetzt (z. B. Fuglestad et al., 2008). Durch die Berücksichtigung des Strahlungsantriebes zu einem einzigen Zeitpunkt ist das Ergebnis allerdings stark vom betrachteten Zeitpunkt und der Wahl des betrachteten zeitlichen Emissionsverlaufes abhängig.

Neben dem absoluten Strahlungsantrieb wird oft auch der Strahlungsantrieb im Verhältnis zu dem einer CO₂-Emission berechnet (Radiative Forcing Index, RFI). Dabei muss berücksichtigt werden, dass beim RFI nicht die Wirkung eines Kilogramms eines Spurenstoffen mit der eines Kilogramms CO₂ verglichen wird, sondern die gesamte Wirkung von Nicht-CO₂-Emissionen mit denen von CO₂. Die Verwendung des Radiative Forcing Indexes birgt die Gefahr, dass ein konstanter Faktor zwischen den CO₂- und den Nicht-CO₂-Effekten zur Bewertung verwendet wird

(Forster et al., 2006). Der Radiative Forcing Index hängt aber, genau wie das Radiative Forcing selbst, sowohl vom betrachteten Zeithorizont als auch von der Emissionsverteilung ab.

Global Warming Potential (GWP)

Eine weitere Metrik, die in Houghton et al. (1990) vorgestellt wurde, ist das 'Global Warming Potential' (GWP). Das GWP ist definiert als der über einen Zeithorizont H integrierte Strahlungsantrieb eines Kilogramms des Spurenstoffes x, dem sogenannten 'Absolute Global Warming Potential' (AGWP), relativ zu dem einer Emission von einem Kilogramm Kohlendioxid:

$$GWP = \frac{AGWP_x}{AGWP_{CO_2}} = \frac{\int_0^H RF_x(t) dt}{\int_0^H RF_{CO_2}(t) dt} .$$

Typische Zeithorizonte H für die Integration, die in IPCC (2007) vorgeschlagen werden, sind 20, 100 oder 500 Jahre. Für die Berechnung des GWP wurde ursprünglich eine Pulsemission, also eine Emission in nur einem Jahr angenommen (Houghton et al., 1990), mittlerweile findet es aber auch für kontinuierliche Emissionen eine Anwendung (z. B. Fuglestvedt et al., 1996). Der Vorteil dieser Metrik ist, dass durch die Integration über einen längeren Zeitraum auch die Lebenszeit der langlebigeren Spurenstoffe berücksichtigt wird. Zudem wird durch die Integration die Abhängigkeit von der Wahl des Zeithorizontes und des zeitlichen Emissionsverlaufes deutlich geringer.

Das Global Warming Potential ist eine wohl definierte physikalische Metrik und wird wegen ihrer einfachen Berechnung zum Beispiel im Kyoto-Protokoll verwendet. Allerdings wird ihre Verwendung auch anhaltend kritisch diskutiert (z. B. Rotmans und Den Elzen, 1992; O'Neill, 2000; Smith und Wigley, 2000), vor allem weil durch das Integral des Strahlungsantriebes kein direkter Zusammenhang mit der Temperaturänderung mehr besteht, obwohl der Name dies implizieren würde. Ursache dafür ist, dass weder die für unterschiedliche Spurenstoffe verschiedenen Klimasensitivitäten (λ), noch die thermische Trägheit des Klimasystems berücksichtigt werden (Wuebbles et al., 2010).

Meist wird der Klimaeinfluss relativ zu dem einer CO₂-Emission berechnet (GWP). Der Vorteil dieser relativen Betrachtung liegt grundsätzlich darin, dass Kohlendioxid sehr gut verstanden ist und eine relative Aussage dadurch insbesondere für Politiker leichter verständlich ist. Außerdem

kann dadurch auch der Vergleich mit anderen Sektoren leichter durchgeführt werden, da die Wirkung von Kohlendioxid unabhängig vom Emissionsort und damit der Emissionsquelle ist.

Global Temperature Potential (GTP)

Das 'Global Temperature Potential' (GTP) ist definiert als die Temperaturänderung durch ein Kilogramm eines Spurenstoffes x zu einem bestimmten Zeitpunkt H ('Absolute Global Warming Potential', AGTP) relativ zu dem einer CO_2 -Emission von einem Kilogramm (Shine et al., 2005):

$$GTP_x(H) = \frac{AGTP_x(H)}{AGTP_{\text{CO}_2}(H)} = \frac{\Delta T_x(H)}{\Delta T_{\text{CO}_2}(H)}.$$

Das AGTP entspricht somit einer Temperaturänderung ΔT zu einem bestimmten Zeitpunkt H . Das GTP ist ebenfalls eine physikalische Metrik, hat aber gegenüber GWP den Vorteil, dass es einer Temperaturänderung entspricht und sowohl die Klimasensitivität als auch die thermische Trägheit des Klimasystems berücksichtigt. Dadurch ist es leicht verständlich und kann auch für die Beschränkung auf eine maximal zulässige Temperaturänderung angewendet werden (z. B. das 2°C -Ziel). Die Berechnung dieser Metrik ist etwas komplizierter als die des Radiative Forcings oder des Global Warming Potentials, aber trotzdem transparent und durch wenige zusätzliche Annahmen durchführbar. Allerdings ist der Einfluss des gewählten Zeithorizonts H deutlich größer als für das GWP, da die Temperaturänderung vor oder nach dem Zeitpunkt H nicht berücksichtigt wird (Shine, 2009), wodurch zwei Szenarien mit demselben GTP eine sehr unterschiedliche Klimawirkung verursachen können.

Average Temperature Response (ATR)

Eine Möglichkeit die Vorteile des GWP und des GTP zu kombinieren, ist die Berechnung einer integrierten oder gemittelten Temperaturänderung über einen Zeithorizont H , wie es zum Beispiel in Shine et al. (2005), Marais et al. (2008), Schwartz und Kroo (2011) oder Gillett und Matthews (2010) vorgeschlagen wird. Die vorgeschlagenen Metriken unterscheiden sich neben der unterschiedlichen Namensgebung auch in den etwas abweichenden Definitionen. Im Rahmen von AviClim wird die Definition und Bezeichnung von Schwartz und Kroo (2011) verwendet, bei der eine gemittelte Temperaturänderung über einen Zeithorizont H für beliebige zeitliche Emissionsverläufe berechnet und als Average Temperature Response (ATR) bezeichnet wird:

$$ATR = \frac{1}{H} \int_0^H \Delta T(t) dt .$$

Dabei ist $\Delta T(t)$ die Temperaturänderung zum Zeitpunkt t und H der gewählte Zeithorizont. Das ATR hat gegenüber dem GWP den Vorteil, dass es einer wirklichen Temperaturänderung entspricht. Gegenüber dem GTP ist von Vorteil, dass nicht nur ein bestimmter Zeitpunkt betrachtet wird, sondern ein längerer Zeitraum, wodurch es weniger vom Zeithorizont und dem angenommen zeitlichen Emissionsverlauf abhängig ist. Durch die Kombination der Vorteile des GWP und des GTP berücksichtigt das ATR sowohl die thermische Trägheit des Klimasystems als auch die unterschiedlichen Klimasensitivitäten sowie die Lebenszeit der unterschiedlichen Spurenstoffe. Da die Klimawirkung der einzelnen Gase insbesondere vom jeweils untersuchten Zeithorizont abhängt, können mit Hilfe der Metrik verschiedene Zeithorizonte analysiert werden, beispielsweise ein Zeithorizont von 20 oder 50 Jahren (atr_{20} oder atr_{50}). Ein mit 20 Jahren relativ kurzer Zeithorizont würde es ermöglichen, die Klimawirkung kurzlebiger Klimagase relativ stärker zu berücksichtigen, ein Analysezeitraum über die nächsten 50 Jahre würde wiederum die Klimawirkung der langlebigeren Gase stärker gewichten.

2.3 Klimafragen und die richtige Metrik

Wie bereits erwähnt, hängt die Wahl der passenden Metrik vom Anwendungsbereich und der Fragestellung ab. Dabei muss neben der Wahl der Metrik auch eine Entscheidung über den untersuchten zeitlichen Emissionsverlauf und Zeithorizont getroffen werden. Für den zeitlichen Verlauf der Emissionen des Luftverkehrs kommen neben Pulsemissionen auch konstante Emissionen oder mit der Zeit veränderliche Emissionen (Szenarien), wie Zunahme oder Abnahme durch ökonomische oder politische Einflüsse, in Betracht. Die Wahl des untersuchten zeitlichen Verlaufs muss hier an die Fragestellung angepasst werden. Für die Bewertung neuer Technologien ist es zum Beispiel sinnvoll, Emissionen über eine durchschnittliche Nutzungsdauer dieser Technologie zu bewerten, da man annehmen muss, dass zum Beispiel ein neues Flugzeug über die gesamte durchschnittliche Nutzungsdauer im Einsatz ist und Emissionen verursacht (Boucher und Reddy, 2008). Will man hingegen bewerten, welchen Einfluss eine Verringerung der Betriebszeit von älteren Flugzeugen um ein Jahr auf das Klima hat, ist eine Pulsemission zu bevorzugen (Boucher und Reddy, 2008), da angenommen werden kann, dass sich die Emissionen nur

in einem einzelnen Jahr ändern, weil das neue Flugzeug ohne diese Vorgabe ein Jahr später eingeführt worden wäre. Weiterhin stellt sich die Frage, welche spezielle Metrik verwendet und welcher Zeithorizont untersucht werden soll, da sich je nach gewähltem Zeithorizont die Gewichtung zwischen kurz- und langlebigen Spurenstoffen ändert. Auch der untersuchte Zeithorizont muss an die Fragestellung angepasst werden. Dies beinhaltet aber eine Wertung zwischen heutigen Änderungen (kurzer Zeithorizont) und Änderungen in den nächsten Generationen (langer Zeithorizont) und kann daher nicht durch eine reine physikalische Erörterung beantwortet werden.

Im Folgenden werden für verschiedene Fragestellung passende Metriken und Emissionsverläufe aufgezeigt:

- Wie hat der Luftverkehr das Klima bis heute beeinflusst? Als Emissionsverlauf für die Berechnung der Klimawirkung muss der zeitliche Verlauf der realen Luftverkehrsemissionen verwendet werden, da deren Wirkung bewertet werden soll. Die passenden Metriken sind der Strahlungsantrieb (RF) und das Absolute Global Temperature Potential (AGTP), also die Temperaturänderung (ΔT), zur heutigen Zeit, da diese die Wirkung zu einem bestimmten Zeitpunkt beschreiben und die Lebenszeit der früheren Emissionen berücksichtigen.
- Trägt eine bestimmte Maßnahme zum Erreichen des 2°C-Ziels bei? Das 2°C-Ziel wurde als politisches Ziel im Sinne eines Grenzwerts definiert, bei dem die Schäden der Klimaänderung noch wirtschaftlich und ökologisch verkraftbar sein sollen (European Commission, 2008). Soll nun untersucht werden, ob eine bestimmte politische Vorgabe dazu beitragen kann, das 2°C-Ziel im Jahr 2050 oder 2100 zu erreichen, sind das Global Temperature Potential bzw. das Absolute Global Temperature Potential mit einem Zeithorizont von 40 oder 90 Jahren ideal, weil sie einen direkten Bezug zur Temperatur liefern. Da das GWP und das RF keinen direkten Zusammenhang mit der Temperaturänderung zeigen, können sie nicht für das 2°C-Ziel verwendet werden. Für den Emissionsverlauf sollte ein Szenario entwickelt und herangezogen werden, da die Luftverkehrsemissionen durch politische Vorgaben über einen längeren Zeitraum verändert werden.
- Klimabewertung neuer Technologien. Zur Klimabewertung neuer Technologien ist die Verwendung der gemittelten Temperaturänderung (ATR) sinnvoll, da diese weniger vom gewählten Zeithorizont abhängig ist und einen Klimaeinfluss zu Beginn des betrachteten Zeithorizonts genauso berücksichtigt wie zum Ende des Zeithorizontes. Zu-

dem ist beim ATR ein direkter Bezug zur verursachten Temperaturänderung gegeben. Als zeitlicher Verlauf sollte, wie oben erläutert die durchschnittliche Nutzungsdauer der Technologie untersucht werden.

- Klimawirkung im Sinne des Kyoto-Protokolls. Das Kyoto-Protokoll ist ein internationaler Vertrag zur Verringerung von Treibhausgasen. Dabei wurde vereinbart, die anthropogenen CO₂-Äquivalentemissionen verschiedener Treibhausgase (CO₂, CH₄, N₂O, HFCs, PFCs, SF₆) innerhalb der Geltungsdauer (2008-2012) um mindestens 5% unter das Niveau des Jahres 1990 zu reduzieren (UNFCCC, 1998). Da die einzelnen Treibhausgase unterschiedliche Lebenszeiten und Klimawirkungen haben, aber dennoch auf möglichst einfache Weise eine Vielzahl verschiedener Emissionen betrachtet werden sollen, werden alle Emissionen in Kohlendioxidäquivalente umgerechnet. Dazu wird das Global Warming Potential einer Pulsemission mit einem Zeithorizont von 100 Jahren verwendet. Eine andere mögliche Metrik wäre auch das ATR relativ zu dem einer CO₂-Emission. Weniger geeignet wäre hingegen die Verwendung des RF oder des GTP, da durch die Wahl des verwendeten Zeithorizontes bereits eine starke Gewichtung zwischen kurz- und langlebigen Spezies stattfinden würde.

Diese Zusammenstellung zeigt, dass es keine eindeutige Metrik für die Berechnung der Klimawirkung des Luftverkehrs gibt. Allerdings ist nicht die Metrik willkürlich, sondern die Bezeichnung ‚Klimafreundlich‘ oder ‚Klimawirkung‘ nicht eindeutig genug. Erst wenn die Fragestellung und der Anwendungsbereich genau genug definiert ist und eine Gewichtung zwischen heutiger und späterer Wirkung getroffen ist, kann eine sinnvolle Metrik definiert werden.

2.4 Berechnung der Klimawirkung

Die Berechnung der Klimawirkung des Luftverkehrs stellt eine besondere Herausforderung dar, da die Klimawirkung neben der Emissionsstärke auch vom Emissionsort (Höhe, geografische Länge und Breite) abhängt. Die Verwendung eines globalen Klima-Chemie-Modells für die Berechnung der Klimawirkung verschiedener Luftverkehrsszenarien wäre sehr rechenzeitintensiv, weshalb hier das vereinfachte Klima-Reaktions-Modell AirClim verwendet wird.

AirClim ist ein Klima-Reaktions-Modell, das Flugzeugemissionen mit vorberechneten atmosphärischen Daten linear kombiniert. Neben CO₂, dem bekanntesten Treibhausgas, werden auch Wasserdampf und Kondensstreifen-Zirren sowie die Wirkung von Stickoxiden auf O₃ und CH₄ be-

rücksichtigt. Grundlage für AirClim sind vorberechnete atmosphärische Daten aus Simulationen mit einem Klima-Chemie-Model (E39/CA). Dazu werden elf verschiedene Höhenbereiche und sieben verschiedene Breitenbereiche definiert, die für den Luftverkehr von Bedeutung sind. Für jede dieser insgesamt 77 Regionen wird eine Klima-Chemie-Simulation durchgeführt mit normierten NO_x - und Wasserdampfemissionen in der jeweiligen Region. Die daraus resultierenden Konzentrations- und Strahlungsflussänderungen (RF) für jede Region dienen als Input für AirClim.

Als Emissionsdatensatz werden der Treibstoffverbrauch, die geflogenen km und die Menge an emittierten NO_x in Abhängigkeit von Höhe und geografischer Länge und Breite benötigt. Diese werden dann mit den vorberechneten atmosphärischen Daten linear kombiniert und daraus ein globales RF berechnet. Neben der regionalen Verteilung der Emissionen muss auch ein zeitlicher Verlauf der Emissionen vorgegeben werden. Der zeitliche Verlauf der Emission und die Lebenszeit der einzelnen Störungen bestimmen dann den zeitlichen Verlauf des RF und dadurch den zeitlichen Verlauf der Temperaturänderung.

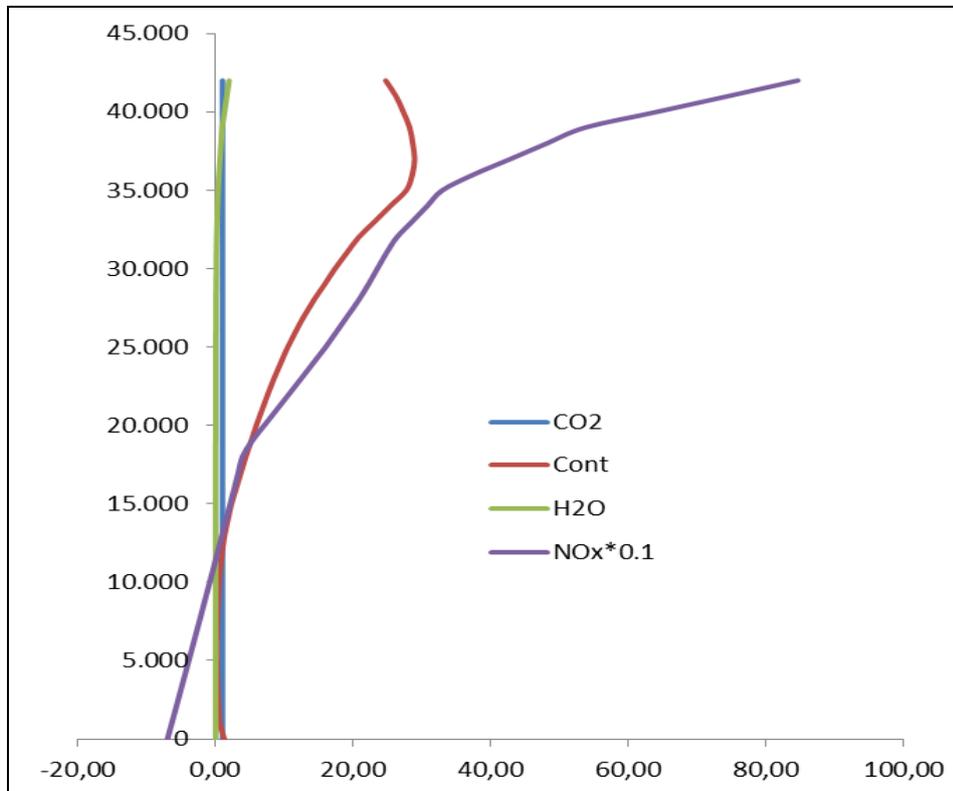
Der Vorteil dieses Modells ist, dass die rechenzeitintensiven Klima-Chemie-Simulationen nur einmal durchgeführt werden müssen und dann für beliebig viele verschiedene Szenarien verwendet werden können. Während die Berechnung der Klimawirkung mit einer Klima-Chemie-Simulation mehrere Wochen benötigen würde, kann dies mit Hilfe von AirClim innerhalb weniger Minuten berechnet werden. Dadurch ist AirClim ein sehr effizientes und schnelles Modell und ermöglicht die Bewertung verschiedenster Emissionsszenarien oder Flugzeugkonfigurationen.

Eine detaillierte Beschreibung sowie eine Evaluierung von AirClim finden sich in Grewe und Stenke (2008). Hier wird eine erweiterte Version von AirClim verwendet, die eine höhere Auflösung vor allem in Reiseflughöhe aufweist (Fichter, 2009) und zudem die Wirkung von Kondensstreifen-Zirrus und langlebigen Ozonabbau berücksichtigt (Dahlmann, 2012).

Zur Berechnung der Kosten für die klimapolitischen Maßnahmen werden CO_2 -Äquivalente für die Nicht- CO_2 -Emissionen benötigt. Da die Wirkung der Luftverkehrsemissionen vor allem von der Höhe in der emittiert wird, abhängt, muss dies bei der Berechnung der CO_2 -Äquivalente berücksichtigt werden. Für die Berechnung der CO_2 -Äquivalente wurde das Klima-Response-Modell AirClim sowie das Emissionskataster des globalen Luftverkehrs in 2010 verwendet (siehe Kapitel 3.4). Dabei wurde zunächst das globale Emissionskataster verwendet und über alle Höhenbereiche summiert, wodurch ein zweidimensionales Feld (Länge, Breite) entsteht. Anschließend wird in AirClim berechnet, welchen Einfluss diese Emission in unterschiedlichen Höhen hat. Dazu wurde die gesamte Emission nacheinander in alle Höhenbereiche emittiert und die Wir-

kung mit AirClim berechnet (0 bis 45 kft in 1kft Schritten). Aus der Klimawirkung dieser hypothetischen Emissionskataster werden die CO₂-Äquivalente in Abhängigkeit der Flughöhe berechnet (siehe Abbildung 2-2).

Abbildung 2-2: Höhenprofil der CO₂-Äquivalente



Quelle: Eigene Darstellung.

2.5 Wahl der Metrik

Bei der Verwendung von Klimametrikern für die Bewertung von klimapolitischen Instrumenten, die auf Einzelflugbasis erfolgen, ist es sinnvoll Pulsemissionen zu betrachten, da jeder einzelne Flug neu reguliert wird und nur der Einfluss dieses einzelnen Fluges bzw. der Einfluss der Summe der einzelnen Flüge untersucht werden soll. Allerdings ist ein klimapolitisches Instrument nur sinnvoll, wenn die Klimawirkung auch positiv beeinflusst wird, falls nicht nur ein Einzelflug durchgeführt wird, sondern über mehrere Jahre hinweg geflogen wird. Deshalb ist es nötig, dass die verwendete Metrik für Pulsemissionen, die zur Berechnung des politischen Instruments verwendet wird, dieselbe qualitative Antwort liefert, wie konstante Emissionen über einen längeren Zeitraum, da der Luftverkehr in der Realität ständig stattfindet.

Im Rahmen von AviClim wurden deshalb verschiedene Metriken bezüglich ihrer Anwendbarkeit für klimapolitische Instrumente untersucht. Dazu wurden fünf verschiedene Einzelrouten aus dem DLR-Projekt CATS (Climate compatible Air Transport System) untersucht (Frankfurt-Shanghai (FRA-PVG), München-New York (MUC-JFK), Palma de Mallorca-München (PMI-MUC), Tokyo-Wien (NRT-VIE) und Dubai-Singapur (DXB-SIN)). Für jede dieser Routen wurden fünf verschiedene Routenoptionen gewählt (geringste Betriebskosten (MinDOC), geringster Treibstoffverbrauch (MinFuel), geringste NO_x-Emission (MinNO_x), Verringerung der Flughöhe um 2 kft (M2kft), MinDoc ohne Berücksichtigung der Kondensstreifen-Zirren (OhneCont)) und dafür jeweils für Pulsemissionen und konstante Emissionen die Klimawirkung mit vier verschiedenen Metriken (RF, GWP, GTP und ATR) für drei verschiedene Zeithorizonte (20, 50 und 100 Jahre) berechnet.

Tabelle 2-1: Klimawirkung der Route Dubai-Singapur für Pulsemissionen (P2010) bzw. konstante Emissionen (S2010) berechnet mit vier verschiedenen Metriken und jeweils drei verschiedenen Zeithorizonten

DXB-SIN										
	P2010					S2010				
	MinDOC	MinFuel	MinNOx	M2kft	Ohne Cont	MinDOC	MinFuel	MinNOx	M2kft	Ohne Cont
RF ₂₀	3,18E-08	3,70E-08	5,20E-08	3,95E-08	3,18E-08	2,44E-05	2,40E-05	6,60E-06	2,11E-05	6,89E-06
RF ₅₀	5,90E-08	5,89E-08	6,78E-08	6,02E-08	5,90E-08	2,42E-05	2,38E-05	7,17E-06	2,10E-05	7,20E-06
RF ₁₀₀	3,84E-08	3,80E-08	4,33E-08	3,88E-08	3,84E-08	2,41E-05	2,37E-05	8,49E-06	2,11E-05	8,55E-06
AGWP ₂₀	2,49E-05	2,44E-05	6,96E-06	2,16E-05	7,02E-06	4,95E-04	4,83E-04	1,34E-04	4,27E-04	1,41E-04
AGWP ₅₀	2,65E-05	2,61E-05	9,02E-06	2,33E-05	8,67E-06	1,22E-03	1,19E-03	3,38E-04	1,05E-03	3,43E-04
AGWP ₁₀₀	2,90E-05	2,85E-05	1,18E-05	2,58E-05	1,11E-05	2,41E-03	2,36E-03	7,23E-04	2,10E-03	7,18E-04
AGTP ₂₀	2,22E-07	2,14E-07	8,62E-08	1,89E-07	1,04E-07	6,32E-06	6,04E-06	2,40E-06	5,31E-06	3,05E-06
AGTP ₅₀	1,19E-07	1,17E-07	6,42E-08	1,06E-07	6,70E-08	1,05E-05	1,01E-05	4,04E-06	8,88E-06	4,96E-06
AGTP ₁₀₀	5,49E-08	5,40E-08	4,40E-08	5,18E-08	4,15E-08	1,31E-05	1,26E-05	5,53E-06	1,12E-05	6,55E-06
ATR ₂₀	3,05E-07	2,91E-07	1,18E-07	2,58E-07	1,46E-07	3,50E-06	3,34E-06	1,36E-06	2,96E-06	1,70E-06
ATR ₅₀	2,19E-07	2,11E-07	9,07E-08	1,87E-07	1,06E-07	6,49E-06	6,22E-06	2,49E-06	5,50E-06	3,05E-06
ATR ₁₀₀	1,50E-07	1,45E-07	7,22E-08	1,31E-07	7,92E-08	9,13E-06	8,80E-06	3,63E-06	7,79E-06	4,32E-06

Quelle: Eigene Darstellung.

In Tabelle 2-1 werden die Ergebnisse der Route Dubai-Singapur exemplarisch dargestellt. Dabei zeigt sich zum Beispiel, dass die Verwendung der Metrik RF je nach gewähltem Zeithorizont, die Routenoption MinDOC bzw. MinFuel als klimafreundlichste ausweisen würde, falls eine Pulsemission im Jahr 2010 zugrunde gelegt wird. Wird hingegen eine konstante Emission angenommen, wäre die Routenoption MinNOx die klimafreundlichste. NO_x-Emissionen beeinflussen das Klima auf zwei Weisen, einerseits durch die Erhöhung der Ozonkonzentration auf einer sehr kurzen Zeitskala und andererseits durch eine Verringerung der Methankonzentration auf einer längeren Zeitskala. Bei Pulsemissionen überwiegt zunächst der starke positive Beitrag der Ozonerhöhung, der aber bereits ein Jahr nach der Emission verschwunden ist, und anschließend der geringere negative Beitrag durch die Methanverringerung, der dafür über einen langen Zeitraum anhält. Da RF nur die Wirkung zu einem einzigen Zeitpunkt berücksichtigt, führt dies dazu, dass

bei Pulsemissionen bereits bei einem Zeithorizont von 20 Jahren die Wirkung von NO_x negativ ist (und damit klimafreundlich), während bei konstanten Emissionen immer die stark positive Wirkung der Ozonerhöhung dominiert, wodurch eine geringere NO_x -Emission klimafreundlicher ist. Ähnliches gilt bei der Verwendung von GTP als Metrik. Da die Temperaturänderung nur zu einem bestimmten Zeitpunkt betrachtet wird, überwiegt auch hier der negative Beitrag der Methanreduktion bei Pulsemissionen, während für konstante Emissionen der positive Beitrag der Ozonproduktion überwiegt.

Zu unterschiedlichen Ergebnissen zwischen Pulsemission und konstanten Emission kommt es auch bei der Verwendung der Metrik GWP. Der Vorteil der Metrik GWP ist, dass die Klimawirkung nicht nur zu einem bestimmten Zeitpunkt berücksichtigt wird, sondern über den gesamten Zeithorizont. Allerdings berücksichtigt AGWP weder die thermische Trägheit des Klimasystems noch die unterschiedlichen Klimasensitivitäten, wodurch es einerseits nicht der tatsächlichen Temperaturänderung entspricht und andererseits dazu führt, dass mit GWP als Metrik andere Routen als klimafreundlich angesehen werden als mit den anderen Metriken. Aus diesem Grund verwenden wir im Rahmen von AviClim die Metrik ATR.

Als Zeithorizont werden 20 und 50 Jahre verwendet. Da für die zeitliche Entwicklung der Emissionen nach 2030 zu wenige Informationen vorliegen, verwenden wir nicht 100 Jahre als Zeithorizont, da dadurch das Ergebnis zu sehr von den getroffenen Annahmen abhängen würde.

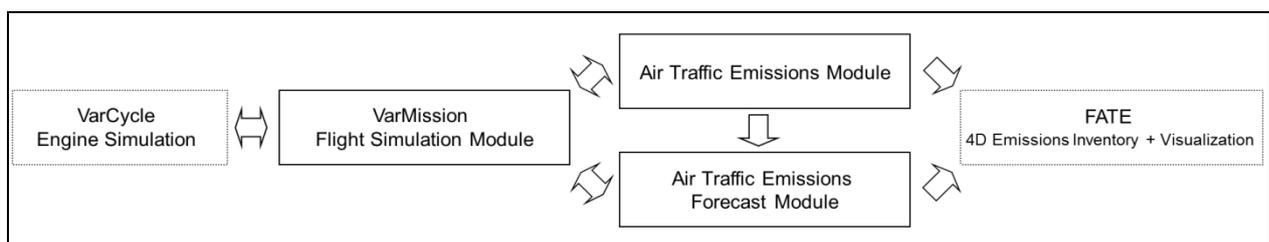
3 Emissionsmodellierung

Wie eingangs erwähnt, werden im Rahmen des Projekts AviClim die Auswirkungen verschiedener politischer Maßnahmen zur Reduktion der klimawirksamen Emissionen des Luftverkehrs untersucht. Als Referenzszenario für derartige Analysen wurde ein „Business-As-Usual“ (BAU) Szenario mit einem Zeithorizont bis zum Jahr 2030 definiert. Die Prognose der Emissionen des Luftverkehrs im BAU-Szenario erfolgt mit Hilfe eines am DLR-Institut für Antriebstechnik entwickelten Simulationsmodells. Dieses Modell, die Annahmen und Eingangsgrößen sowie Ergebnisse bezüglich der Emissionen des Luftverkehrs im BAU-Szenario werden in den folgenden Abschnitten vorgestellt.

3.1 Modellbeschreibung

Das verwendete Simulationsmodell stellt eine weitgehend automatisierte Modellkette dar, deren Einzelmodule die Teilaspekte Triebwerkemissionen, Flugmissionssimulation, Luftverkehrssimulation und Luftverkehrsprognose abdecken. Ein weiteres Modul namens FATE erstellt dreidimensionale Emissionskataster des Luftverkehrs, welche zur Visualisierung der Ergebnisse und zur Bestimmung des Klimaeinflusses des Luftverkehrs zum Einsatz kommen. Abbildung 3-1 zeigt die verwendete Modellkette im Überblick.

Abbildung 3-1: Modellkette zur Quantifizierung der Emissionen des Luftverkehrs



Quelle: Eigene Darstellung.

Die VarCycle Software ermöglicht die Simulation von Flugtriebwerken inkl. der Ermittlung von Triebwerkemissionen. Bei VarMission handelt es sich um eine Software zur Simulation einzelner Flugmissionen. Hierzu greift VarMission auf DLR-eigene Flugzeug- und Triebwerkmodelle sowie auf Modelle der BADA Datenbank (vgl. EUROCONTROL, 2011) zurück. Die Ergebnisse von VarMission wiederum werden in den Modulen zur Emissionsberechnung auf Luftverkehrsebene und für die Emissionsprognose verwendet. Zur Simulation des weltweiten Luftverkehrs kommen

weltweite Flugpläne aus OAG (2000ff.) zum Einsatz. Unter Nutzung eines „Bottom-Up“-Ansatzes werden im Air Traffic Emissions Module die weltweiten Gesamtemissionen des Luftverkehrs errechnet, indem Emissionsmengen für jeden Einzelflug des Flugplans abgeschätzt werden. Die Prognose der Luftverkehrsemissionen im Air Traffic Emissions Forecast Module basiert auf angenommenen (regional aufgelösten) Wachstumsraten des Verkehrs und einem Modell der zukünftigen Flottenentwicklung. Das Modul FATE stellt einen weiteren (optionalen) Bestandteil der Modellkette dar und ermöglicht eine Visualisierung der räumlichen und zeitlichen Verteilung der Emissionen in einem dreidimensionalen Koordinatensystem rund um den Globus. Der Detaillierungsgrad der Einzelmodule ist so gewählt, dass eine Prognose der Schadstoffemissionen mit mittelfristigem Zeithorizont bis ca. ins Jahr 2030 hinreichend genau möglich ist. Weitere Details zum angewandten Modell finden sich in Schaefer (2012).

3.2 Annahmen für das Business-as-usual-Szenario

Als Basisjahr für die Prognose des Business-as-usual-Szenarios dient das Jahr 2010. Die Flugbewegungen des Jahres 2010 wurden anhand von weltweiten OAG Flugplänen (OAG, 2000ff.) ermittelt. OAG-Flugplandaten wurden als Datengrundlage gewählt, weil umfassende Daten zu den tatsächlichen Flugbewegungen nicht öffentlich zugänglich sind. OAG-Flugpläne enthalten Daten zu allen geplanten Flügen im Passagier- und Frachtluftverkehr und einigen außerplanmäßigen Flügen im Passagierverkehr. Hierin ist auch ein Großteil der Charterflüge im Passagierluftverkehr enthalten. Es fehlen jedoch die meisten Expressfrachtflüge und alle Ad-hoc-Frachtflüge. Da Flugpläne für diese Flüge, die weltweit durchgeführt werden, nicht öffentlich zugänglich sind, ist es nicht möglich, diese Flüge in unser Simulationsmodell zu integrieren. Dies muss bei den nachfolgenden Analysen berücksichtigt werden.

Die wesentlichen Annahmen für die Emissionsprognose bis zum Jahr 2030 lassen sich in die folgenden Kategorien gliedern:

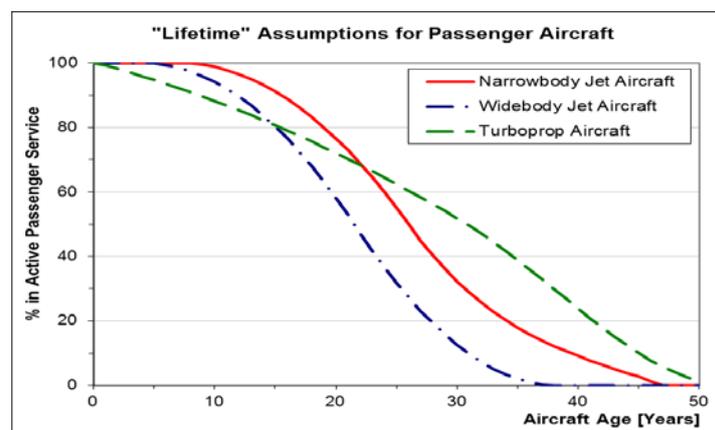
- Verkehrswachstum: Die Wachstumsraten des Verkehrs im BAU-Szenario entsprechen denen des Airbus Global Market Forecast 2011-2030 (Airbus, 2011).
- Flottenentwicklung: Die Flottenprognose basiert auf typischen Lebensdauerannahmen für Luftfahrzeuge. Zukünftige Flugzeugtypen werden gemäß den aktuellen Produktionsplänen der großen Flugzeughersteller der Flotte zugeführt.

- Technologieannahmen: Zukünftige Flugzeug- und Triebwerktypen werden anhand von DLR-Flugzeug- und Triebwerkmodellen in VarCycle bzw. VarMission simuliert. Die Simulationsmodelle orientieren sich dabei an Herstellerangaben zur Leistungsfähigkeit zukünftiger Technologien.
- Politikannahmen: Es wird davon ausgegangen, dass im Zeitraum 2010 bis 2030 keine umfassenden politischen Maßnahmen zur Reduktion der Treibhausgasemissionen des Luftverkehrs neu hinzukommen.

Der Airbus Global Market Forecast (GMF) gehört zusammen mit dem Boeing Market Outlook zu den gängigsten Verkehrsprognosen des Luftverkehrs. Für AviClim wurden regionale Wachstumsraten des Passagierverkehrsaufkommens aus dem Airbus GMF 2011-2030 (Airbus, 2011) entnommen. Die durchschnittliche jährliche Wachstumsrate des Verkehrs bezogen auf Passagierkilometer liegt dabei bei 4,8%. Da in der aktuellen Ausgabe des Airbus GMF der Frachtverkehr nicht betrachtet wird, wurden entsprechende Wachstumsraten für Fracht-Tonnen-Kilometer ersatzweise dem Airbus GMF 2010-2029 (Airbus, 2010) entnommen.

Zum Zwecke der Flottenprognose werden Annahmen zur Lebensdauer existierender Flugzeuge getroffen, welche in Abbildung 3-2 grafisch dargestellt sind. Diese Annahmen für Turboprop-, Schmalrumpf- und Großraumflugzeuge wurden auf Basis historischer Daten der ASCEND Online Fleets Datenbank (ASCEND, 2011) ermittelt.

Abbildung 3-2: Annahmen zur durchschnittlichen Lebensdauer von Flugzeugklassen

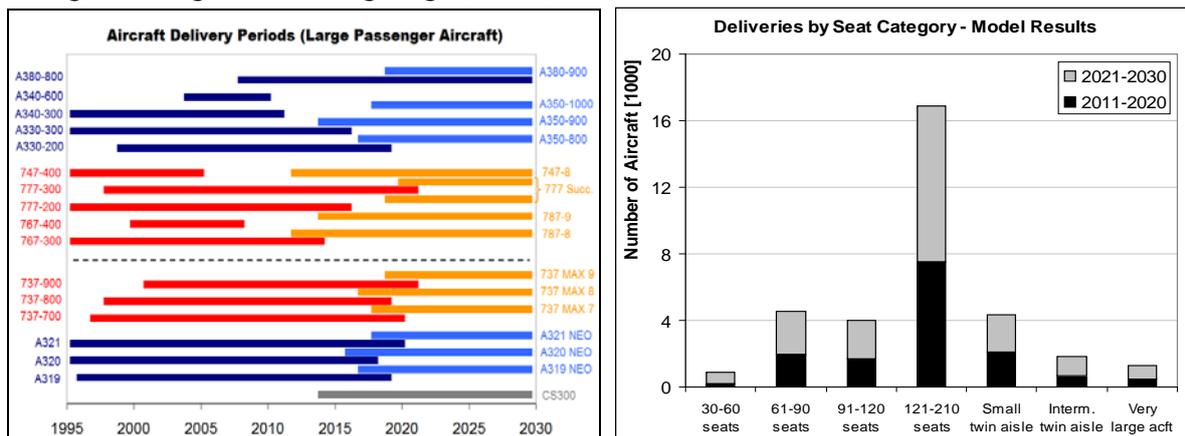


Quelle: Eigene Darstellung auf Basis von ASCEND (2011).

Basierend auf der gegebenen Altersstruktur der Flugzeugflotte im Basisjahr der Prognose, den genannten Annahmen zur Flugzeuglebensdauer sowie Annahmen zur Produktionsdauer aktuel-

ler und zukünftiger Flugzeugmuster lässt sich die zukünftige Flottenzusammensetzung prognostizieren. Abbildung 3-3 (linkes Diagramm) zeigt die Annahmen bezüglich der angenommenen Produktionszeiträume von Flugzeugtypen, welche sich an den aktuellen Plänen der großen Flugzeughersteller orientieren. Als weitere Input-Größen der Flottenprognose fungiert die Größenverteilung der neu ausgelieferten Flugzeuge, welche im rechten Diagramm der Abbildung 3-3 ersichtlich ist. Die angenommene Größenverteilung im Referenz-Szenario entspricht einer Kombination der Prognosen des Airbus GMF (2011) und des Embraer Market Outlooks (2011). Die absolute Anzahl neu ausgelieferter Flugzeuge ergibt sich als Resultat aus den genannten Input-Größen unter der Annahme, dass das prognostizierte Verkehrsnachfragewachstum befriedigt werden muss. Die Marktanteile konkurrierender Verkehrsflugzeugtypen innerhalb eines Flottensegments wurden auf Basis aktueller Bestellzahlen abgeschätzt.

Abbildung 3-3: Produktionszeiträume großer Verkehrsflugzeuge (links) und Größenverteilung neu ausgelieferter Flugzeuge (rechts)



Quelle: Schaefer (2012).

Während die gegenwärtige Flotte an Luftfahrzeugen für die Emissionsberechnung weitgehend durch die EUROCONTROL BADA-Datenbank abgedeckt wird, werden die wichtigsten Flugzeug-Triebwerk-Kombinationen der Zukunft am DLR simuliert und durch entsprechende Modelle in der Software VarMission nachgebildet. Zur Emissionsberechnung wird dabei auf detaillierte VarCycle-Triebwerkmodelle des DLR-Instituts für Antriebstechnik zurückgegriffen. Für die gegenwärtige Studie kommen Simulationsmodelle der Boeing 747-800, der Boeing 787 (sowohl in einer Variante mit GE als auch mit Rolls-Royce Triebwerken), des Airbus A350XWB, des Airbus A320 NEO sowie eines generischen Regionaljets zum Einsatz. Die Emissionen weiterer zukünftiger Flugzeug- und Triebwerktypen werden auf Basis der o.g. simulierten Modelle abgeschätzt – wobei sich die Abschätzungen an Prognosen der Flugzeughersteller orientieren. Details zu den

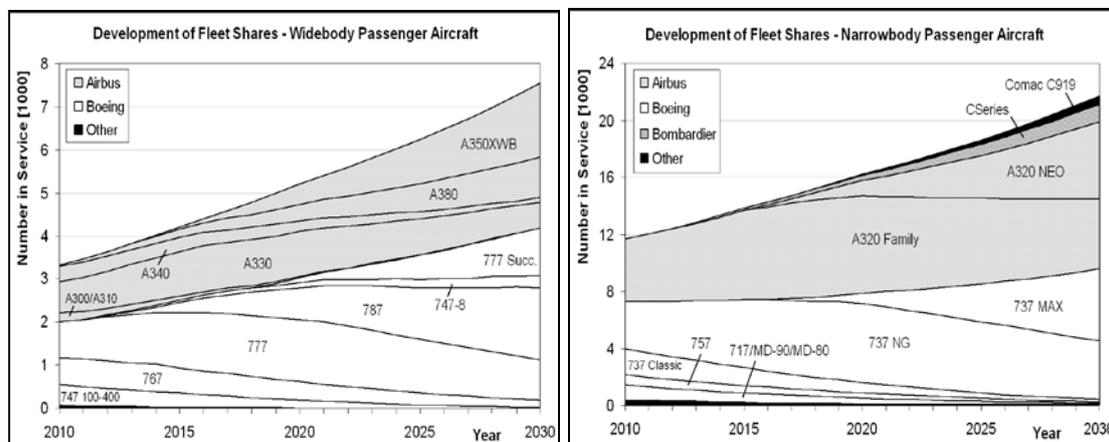
Flugzeug- und Triebwerkmodellen inklusive eines Vergleichs ihrer spezifischen Emissionen mit Referenzmodellen der Vorgänger-Generation lassen sich Schaefer (2012) entnehmen.

Das Business-As-Usual-Szenario berücksichtigt weiterhin einen moderaten Anstieg der durchschnittlichen Flugzeugauslastung von 78% im Jahr 2010 auf 81% im Jahr 2030. Hierbei wird die ausschließliche Nutzung konventioneller Kraftstoffe (Kerosin) angenommen. Eine Verbesserung des Air Traffic Managements (ATM) gemäß Technologiezielen der CANSO (CANSO, 2008) wird ebenfalls unterstellt. Dabei wird von einer Erhöhung der ATM-Effizienz von derzeit 93% auf 97% im Jahr 2050 (95-96% im Jahr 2030) ausgegangen. Dies führt zu einer Verringerung des zusätzlichen Treibstoffverbrauchs, die auf ATM-Maßnahmen (z.B. Umwege, Warteschleifen etc.) zurückzuführen ist.

3.3 Emissionsprognose bis 2030 im BAU Szenario

Die Ergebnisse der Prognose umfassen die zukünftige Flottenzusammensetzung sowie den Treibstoffverbrauch und die NO_x-Emissionen des Luftverkehrs. Die CO₂-Emissionen lassen sich durch die Multiplikation des Treibstoffverbrauchs mit dem Faktor 3,155 errechnen. Abbildung 3-4 zeigt die prognostizierte Flottenzusammensetzung, welche aus den oben genannten Annahmen resultiert. Im Widebody Segment dominieren bis zum Jahr 2030 die Boeing 787, ein angenommener Nachfolger der Boeing 777, der Airbus A350XWB und der A380. Im Narrowbody Segment lösen A320 NEO und Boeing 737 MAX ihre Vorgänger als die am meisten verbreiteten Luftfahrzeuge ab.

Abbildung 3-4: Flottenentwicklung im BAU-Szenario



Quelle: Eigene Darstellung.

Tabelle 3-1 fasst die wesentlichen Ergebnisse der Prognose hinsichtlich des Treibstoffverbrauchs und der Emissionen zusammen. Die nachfolgende Abbildung 3-5 visualisiert den prognostizierten Treibstoffverbrauch des Luftverkehrs vom Jahr 2000 bis ins Jahr 2030. Das linke Diagramm in Abbildung 3-5 verdeutlicht zudem die Effekte verschiedener Einflussfaktoren: Einem Wachstum der Verkehrsleistung von 5,1% pro Jahr (bezogen auf die Gesamtverkehrsleistung, d. h. Passagier- und Frachtverkehr in Tonnen-Kilometer) steht ein prognostiziertes Wachstum des Treibstoffverbrauchs von durchschnittlich 3,9% pro Jahr gegenüber. Dabei hat die Erneuerung der weltweiten Flugzeugflotte den größten Anteil an der Verbesserung der Treibstoffeffizienz.

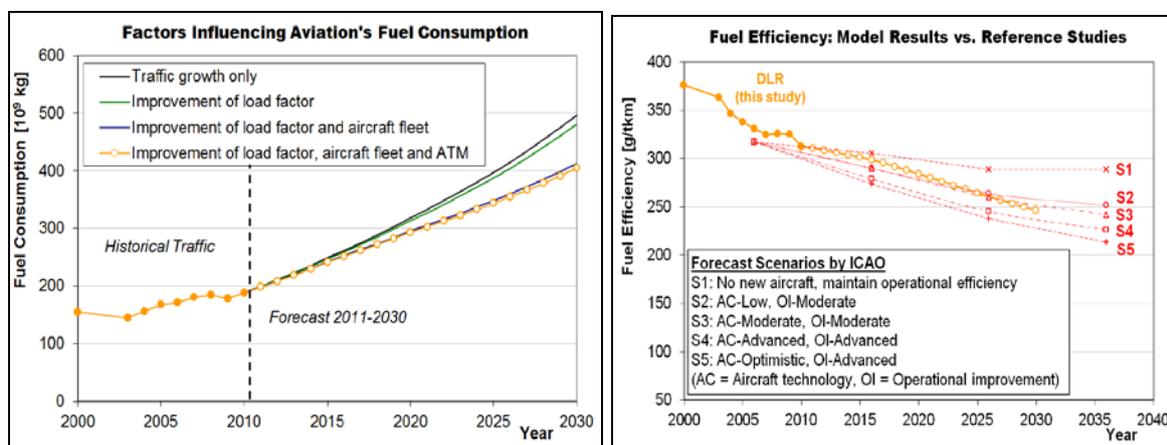
Tabelle 3-1: Ergebnisse der Prognose im Business-As-Usual Szenario

Jahr	Flüge [10 ⁶]	Entfernung [10 ⁹ km]	Passagier-Km [10 ¹²]	Tonnen-Km [10 ⁹] (Pax+Cargo)	Treibstoffverbrauch [10 ⁹ kg]	NO _x Emissionen [10 ⁹ kg]
2010	30,5	37,5	4,95	603	188	2,47
2015	38,1	47,7	6,59	801	241	3,20
2020	46,2	58,8	8,38	1032	293	3,89
2025	54,2	70,1	10,33	1301	344	4,43
2030	64,1	84,0	12,74	1640	405	4,96

Quelle: Eigene Darstellung.

Zwischen 2010 und 2030 verbessert sich die Treibstoffeffizienz (in Gramm Kraftstoff pro Tonnen-Kilometer) um durchschnittlich 1,2% pro Jahr. Ein Vergleich der prognostizierten Entwicklung mit Szenarien der ICAO (ICAO, 2010c) ist im rechten Diagramm der Abbildung 3-5 zu finden. Die leichte Abweichung im Basisjahr der ICAO Prognose im Vergleich zur DLR-Prognose ist auf Unterschiede bei der Modellierung zurück zu führen. Bezüglich des relativen Verlaufs der Treibstoffeffizienz bis zum Jahr 2030 liegt die vorliegende Prognose für das BAU-Szenario zwischen den ICAO-Szenarien S3 und S4.

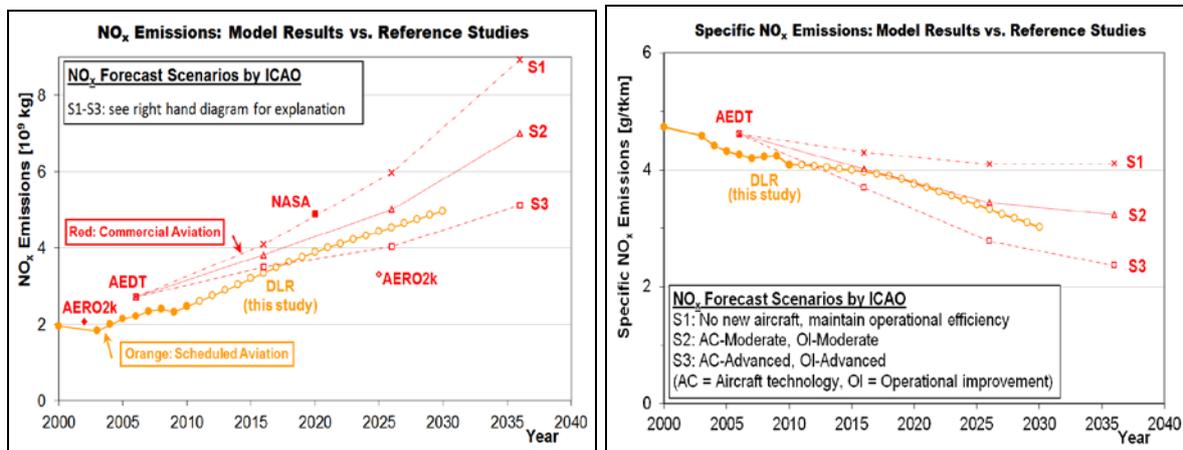
Abbildung 3-5: Treibstoffverbrauch des Luftverkehrs im BAU-Szenario



Quelle: Eigene Berechnungen.

Die Prognose für die NO_x-Emissionen des Luftverkehrs zeigt Abbildung 3-6. Zu Vergleichszwecken sind entsprechende Referenzstudien (ICAO, 2009a; Eyers, 2004 und Sutkus, 2003) in den Diagrammen mit eingezeichnet. Die Abweichung der diversen Studien in den Basisjahren der Prognosen ist auf ein Zusammenwirken verschiedener Faktoren zurückzuführen. Dabei spielen die Abdeckung des weltweiten Luftverkehrs durch das jeweils verwendete Modell sowie die angewandte Berechnungsmethodik für NO_x-Emissionen die größten Rollen. Die vorliegende DLR-Studie nutzt die DLR-Fuel Flow Korrelationsmethodik, um die NO_x-Emissionen im Reiseflug zu errechnen. Diese Methode wurde am DLR-Institut für Antriebstechnik entwickelt und kam gleichermaßen im europäischen Forschungsprojekt AERO2k (Eyers, 2004) zum Einsatz. Der Unterschied zwischen dem AERO2k-Wert für NO_x-Emissionen im Jahr 2002 und den hier errechneten Werten ist auf die etwas größere Abdeckung des Weltluftverkehrs in AERO2k (unter Nutzung von Radardaten der Flugsicherungsunternehmen) zurückzuführen. Die deutlich größere Abweichung zu den NO_x-Emissionen aus dem amerikanischen AEDT Modell (ICAO, 2009a) ist darauf zurückzuführen, dass in den AEDT-, ICAO- und NASA-Berechnungen eine von Boeing entwickelte Fuel Flow Korrelation zur NO_x-Berechnung Verwendung findet, welche im Mittel etwas höhere Emissionen liefert. Der relative Verlauf der prognostizierten NO_x-Emissionen bis zum Jahr 2030 ist in den ersten Jahren der Prognose weniger optimistisch als die ICAO-Szenarien S1-S3 und ähnelt ab etwa dem Jahr 2020 dem ICAO-Szenario S2.

Abbildung 3-6: NO_x-Emissionen des Luftverkehrs im BAU-Szenario

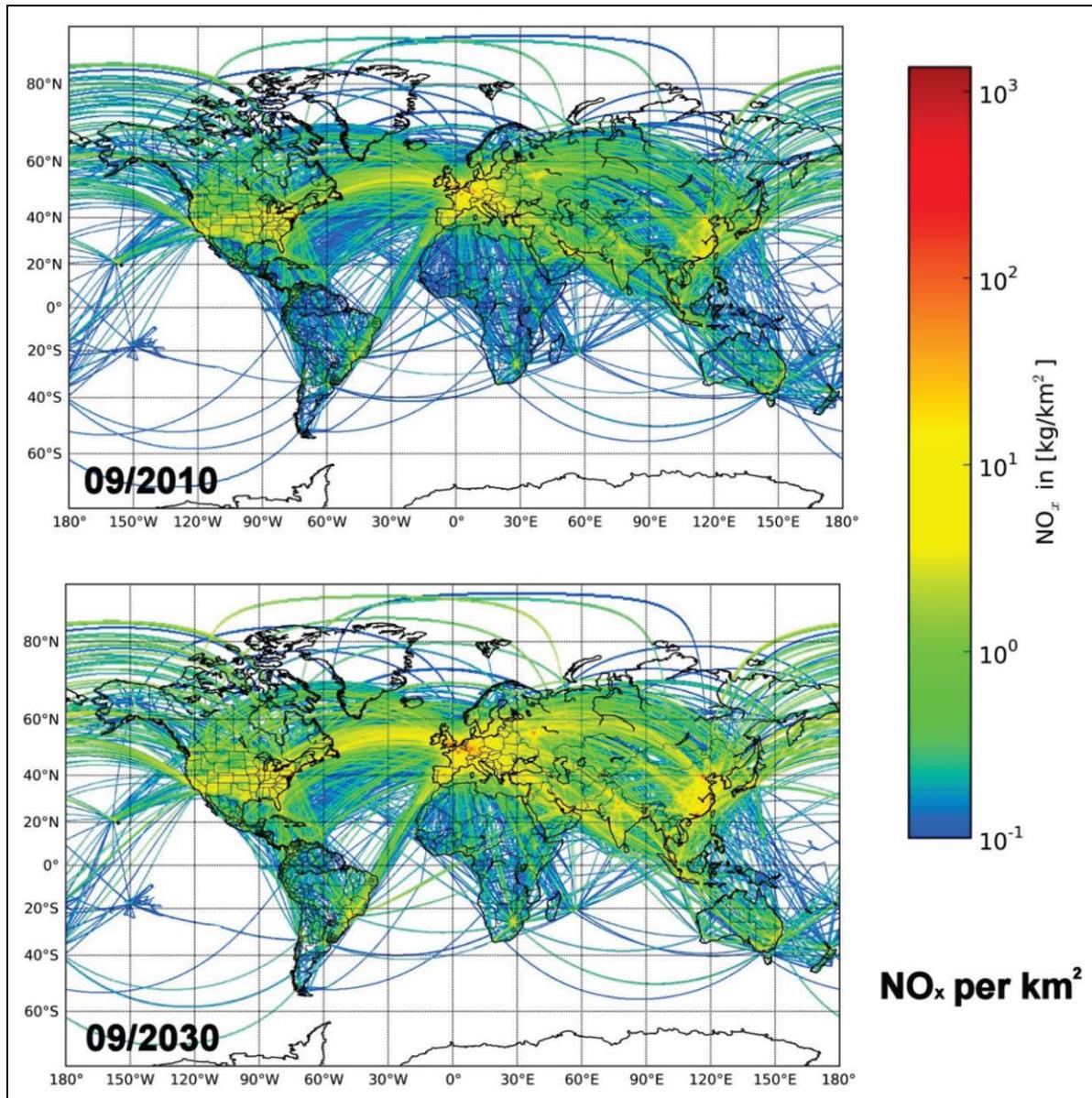


Quelle: Eigene Berechnungen.

3.4 Kombination des BAU-Szenario mit 4D-Race

Abbildung 3-7 zeigt beispielhaft die regionale Verteilung der NO_x -Emissionen des Luftverkehrs im Jahre 2010 im Vergleich zu 2030 in der Business-as-usual-Entwicklung, welche durch das Programmmodul 4D-Race des DLR-Instituts für Flughafenwesen und Luftverkehr erstellt wurde. 4D-Race erzeugt Emissionskataster des Luftverkehrs als Grundlage für die Bestimmung der Klimawirksamkeit. Dazu werden nicht nur die im dreidimensionalen Raum und der Zeit verteilten langlebigen CO_2 -Emissionen ermittelt, sondern auch entsprechende Emissionen kurzlebiger Luftschadstoffe wie NO_x , SO_x und Ruß. Diese vierdimensionale Codierung erlaubt es unter anderem, den im Tagesverlauf wechselnden Einfluss der Sonnenstrahlung auf die chemischen Reaktionen der Luftverkehrsemissionen in der Atmosphäre zu untersuchen. Für spezielle Untersuchungen können auch Emissionskataster bestimmter Regionen, Zeiträume, Flugzeug- oder Triebwerktypen ermittelt werden. Ebenfalls kann bei 4D-Race die zeitliche und räumliche Auflösung des Emissionskatasters der Fragestellung angepasst werden. Auf Basis des Emissionskatasters für das Jahr 2010 in Verbindung mit der Emissionsprognose des DLR-Instituts für Antriebstechnik, die in Kapitel 3.3 dargestellt wurde, werden im Rahmen des AviClim-Projekts verschiedene Metriken zur Bewertung der Klimawirksamkeit des Luftverkehrs abgeschätzt. Weiterhin werden alternative geopolitische Szenarien in Kombination mit verschiedenen klimapolitischen Maßnahmen analysiert und mit dem Referenzszenario (Business-As-Usual, BAU) verglichen.

Abbildung 3-7: Verteilung der NO_x-Emissionen des Luftverkehrs in den Jahren 2010/2030 in der Business-as-usual-Entwicklung



Quelle: Eigene Berechnungen.

4 Konzeption der politischen Maßnahmen und Szenarien

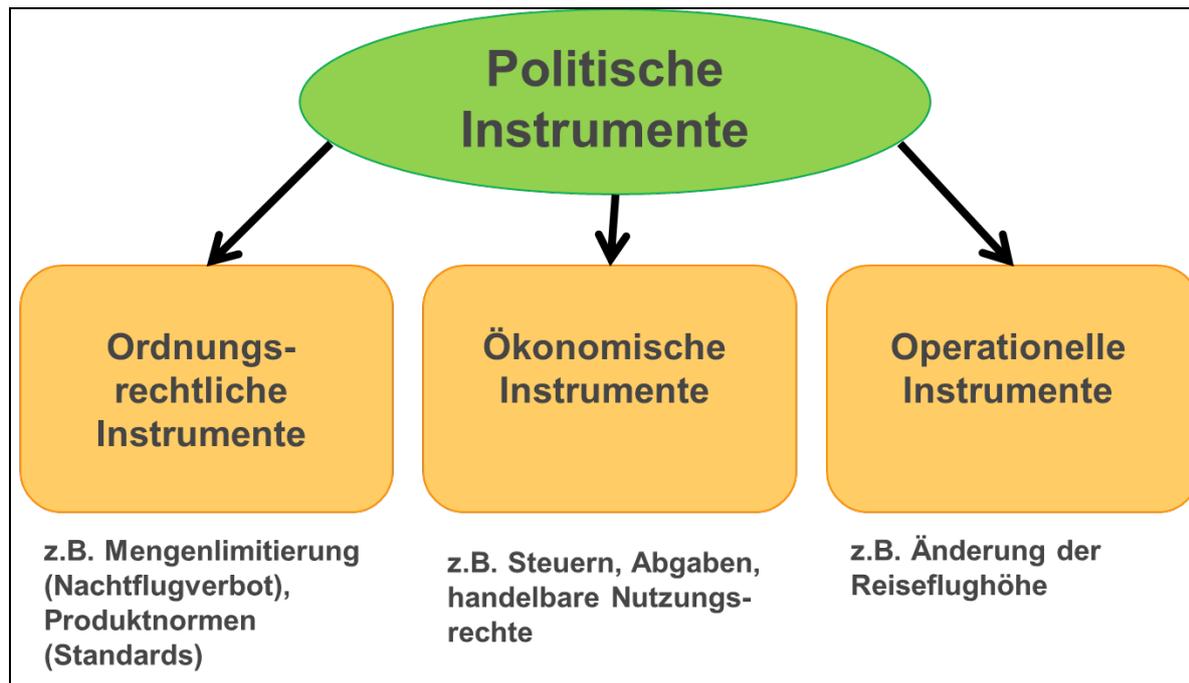
4.1 Konzeption der politischen Maßnahmen

4.1.1 Analyisierte Instrumente im Überblick

Prinzipiell gibt es verschiedene Ansatzpunkte, um die klimawirksamen Emissionen des Luftverkehrs zu limitieren: Neben technologischen Maßnahmen wie z. B. der Entwicklung hocheffizienter Triebwerke, dem verstärkten Einsatz von alternativen Kraftstoffen wie beispielsweise Biofuels, Verbesserungen im Air Traffic Management (ATM), z. B. durch optimierte Flugrouten, können klimarelevante Emissionen auch durch operationelle Maßnahmen wie modifizierte An- und Abflugverfahren und durch den Einsatz sog. umweltpolitischer Instrumente wie Grenzwerte oder marktwirtschaftliche Instrumente reduziert werden. Im Rahmen dieses Forschungsprojektes konzentrieren wir uns auf die Möglichkeiten, klimawirksame Emissionen im Luftverkehr durch umweltpolitische Instrumente sowie operationelle Maßnahmen zu begrenzen.

Basierend auf einer umfangreichen Literaturrecherche, die den Stand der Forschung abbildet und unter Berücksichtigung der aktuellen politischen Diskussion werden im Folgenden geeignete umweltpolitische Instrumente identifiziert, die sich für eine Einbeziehung aller klimarelevanten Emissionen des Luftverkehrs in internationale Klimaschutzprotokolle eignen könnten. Betrachtet werden in diesem Zusammenhang verschiedene Instrumente aus den folgenden drei Kategorien:

Abbildung 4-1: Kategorien der betrachteten politischen Instrumente



Quelle: Eigene Darstellung.

Ordnungsrechtliche Instrumente regulieren die Höhe der Schadstoffemissionen z.B. durch Gebote und Verbote, Grenzwerte und Standards. Zur Begrenzung von Umweltauswirkungen von Flugzeugen wurden seitens der ICAO international bindende Richtlinien zu Zertifizierungsstandards für die Zulassung neuer Flugzeugtriebwerke ausgearbeitet. Diese sind im Band 2 des Annex 16 zu finden und beinhalten z.B. Grenzwerte für Emissionen von Stickoxiden (NO_x), Kohlenmonoxide (CO), unverbrannte Kohlenwasserstoffe (HC) und Rauch (die sog. Smoke Number). Diese Richtlinien sind von den Vertragsstaaten in national gültiges Recht umzusetzen. Von besonderer Bedeutung ist der NO_x Standard, der bereits im Jahre 1981 verabschiedet und in den folgenden Jahren weiter verschärft wurde. Im Februar 2010 (CAEP/8) wurde ein neuer NO_x Standard vereinbart, der den aktuellen Standard bis zu 15% verbessern soll. Dieser neue Standard trat zum 31. Dezember 2013 in Kraft. Darüber hinaus wird ein CO₂-Standard diskutiert, der im Rahmen von CAEP/9 ab dem Jahr 2013 entwickelt wird.

Neben den oben diskutierten Grenzwerten findet man im Luftverkehr auch lokale Grenzwerte zur Verbesserung der lokalen Luftqualität und zur Lärmbegrenzung. So zeigt sich in Bezug auf Lärm eine steigende Anwendung von Betriebsbeschränkungen für bestimmte Flugzeugtypen sowie Nachtflugeinschränkungen bzw. -verbote. Speziell die Beschränkungen von Nachtflügen, die in ihrer Eingriffstiefe ein besonders starkes ordnungsrechtliches Instrument darstellen, sind in

diesem Zusammenhang derzeit nicht zuletzt in Deutschland intensiv in der Diskussion.¹ Die allgemeine Tendenz zeigt hier eine verstärkte Hinwendung zu diesem ordnungsrechtlichen Instrument in unterschiedlicher Ausprägung. Generell werden Betriebsbeschränkungen von Flugzeugen international durch den Band 1 des ICAO Annex 16, in dem die Lärmkriterien bestimmter Flugzeugtypen definiert sind, geregelt. So wurde von den Vertragsstaaten der ICAO unter der Begrifflichkeit „Betriebsbeschränkungen“ beispielsweise vereinbart, weltweit bis 2002 alle sog. Chapter-2-Flugzeuge (ICAO-Lärmklasse 2) für den kommerziellen Luftverkehr stillzulegen. Weitere Grenzwerte bezogen auf die Luftqualität findet man in der EU-Richtlinie 2008/50/EG vom 11. Juni 2008.

Eine weitere mögliche ordnungsrechtliche Maßnahme im Luftverkehr wäre z. B. die Beschränkung der Kurzstreckenverkehre unter der Voraussetzung, dass Alternativen zum Luftverkehr existieren. Eine mögliche Ausgestaltung wäre die Verlagerung von Reisen von einer Entfernung bis zu z. B. 500 Kilometern auf andere Verkehrsmittel durch ein entsprechendes Ge- oder Verbot. Insbesondere Hochgeschwindigkeitsbahnen würden von dieser Verlagerung profitieren. Unter Umständen könnte diese Maßnahme jedoch zu höheren Emissionen des Luftverkehrs führen, wenn die freiwerdenden Kapazitäten auf Flughäfen für zusätzliche Mittel- und Langstreckenflüge genutzt werden. Dann wären weitere politische Eingriffe erforderlich.

Trotz der ökologischen Effektivität der oben beschriebenen Maßnahmen stellen diese Instrumente jedoch nicht zwingend die kosteneffizientesten dar. Speziell aus Sicht der Flugzeugbetreiber führen ordnungsrechtliche Maßnahmen meist zu höheren Kosten, die auf geringeren Betriebszeiten und entsprechend weniger durchführbaren Flügen basieren. Durch die entsprechenden politischen Eingriffe kann folglich das sehr fein abgestimmte Netzwerk einer Fluggesellschaft empfindlich gestört werden.

Die negativen Effekte von Betriebsbeschränkungen betreffen stets mindestens zwei Akteure (Flughäfen und Fluggesellschaften) und können sowohl direkter, indirekter und induzierter Natur sein (MPD Group, 2005; Cooper und Smith, 2005; Klophaus, 2010). Aufgrund dieser Bandbreite an möglichen Effekten sollten vor Einführung eines ordnungsrechtlichen Instrumentes die Kosten und Nutzen daher genauestens und auf den Einzelfall bezogen bestimmt werden, um bereits im Vorfeld negative ökonomische Auswirkungen möglichst zu verhindern oder zumindest zu verringern.

¹ Dies zeigt nicht zuletzt die Entwicklung am Frankfurter Flughafen. Im Oktober 2011 wurde vom Hessischen Verwaltungsgerichtshof zunächst ein vorläufiges Nachtflugverbot zwischen 23 und 5 Uhr für geplante Flüge

Zu den **umweltökonomischen Instrumenten** zählen sowohl Steuern als auch lärm- bzw. emissionsabhängige Entgelte und der Emissionshandel. Das Ziel dieser Instrumente ist es, einen ökonomischen Anreiz zur Vermeidung von Emissionen zu geben. Zudem tragen diese Instrumente dazu bei, die negativen externen Effekte in Form von Umweltverschmutzung zu internalisieren. Im ökonomischen Sinn stellen Schäden durch Treibhausgasemissionen wie z. B. Überflutungen negative Externalitäten dar, da die Emittenten nicht die (vollen) Kosten ihres Handelns tragen (Stern, 2007). Das Vorliegen solcher negativen Externalitäten hat somit eine Verzerrung der Marktpreise zur Folge. Dies liegt darin begründet, dass die tatsächlichen Kosten, die durch die Schädigung der Umwelt entstehen, in den Marktpreisen nicht berücksichtigt werden. In der Volkswirtschaftslehre stellen externe Effekte folglich eine Ursache für Marktversagen dar, da die Preisbildung am Markt nicht oder nur unzureichend funktioniert.

Übertragen auf den Luftverkehr haben Emissionen des Luftverkehrs negative Auswirkungen auf das Klima und somit auch auf unbeteiligte Dritte. Hierdurch entstehen dementsprechend negative externe Effekte und volkswirtschaftliche Kosten für die Allgemeinheit, die vom Anbieter und Nachfrager von Luftverkehrsdienstleistungen nicht in ihr Entscheidungskalkül einbezogen werden. Umweltpolitische Instrumente können jedoch zu einer zumindest teilweisen Internalisierung dieser externen Effekte beitragen. Hierzu können z. B. umweltökonomische Instrumente angewandt werden.

Generell lassen sich zwei Kategorien von umweltökonomischen Instrumenten unterscheiden: preisgesteuerte Instrumente, wie z. B. CO₂-Steuern, und mengengesteuerte Instrumente, wie z. B. ein CO₂-Emissionshandel. Wenn der politische Regulierer die genauen Schadenskosten kennt und somit den Preis pro Schadstoffeinheit korrekt festlegen kann, resultieren bei beiden Instrumententypen die gleichen Emissionsreduktionsmengen. In diesem Fall sind beide Instrumententypen substituierbar (OECD, 2006). Jedoch gelingt es dem politischen Regulierer in der Realität normalerweise nicht, die Schadenskosten ex ante konkret zu ermitteln. Es existieren also Unsicherheiten, die die Ermittlung eines optimalen Preises erschweren. Bei den mengengesteuerten Instrumenten wird der Preis wiederum am Markt gebildet. Aus diesem Grund sind mengen- und preisgesteuerte Instrumente in der Praxis in aller Regel nicht substituierbar.

Steuern und Entgelte fallen in die Kategorie der preisgesteuerten Instrumente, da hier ein Preis vom Regulierer vorgegeben wird. Durch die Schaffung eines Preises soll ein ökonomischer Anreiz entstehen, um Umweltbelastungen seitens der Emittenten zu reduzieren. Es wird dem Markt

verfügt, das im April 2012 vom Bundesverwaltungsgericht in Leipzig nochmals bis auf weiteres bestätigt wurde.

selbst überlassen, den ökonomisch optimalen Anteil an Schadstoffen zu ermitteln (OECD, 2010). Im Vergleich dazu limitiert der Emissionshandel als alternatives umweltökonomisches Instrument die Emissionsmenge für einen bestimmten Zeitraum über eine Beschränkung der Emissionen auf einem vordefinierten Wert (*cap*). Hierzu werden Emissionsrechte in Höhe des definierten *caps* ausgegeben, die dann unter den Beteiligten frei gehandelt werden können. Ziel des Emissionshandels ist es, vorgegebene Emissionsreduktionsziele möglichst kosteneffizient zu erreichen.

Die Lenkungswirkung umweltökonomischer Instrumente und deren mögliche Effekte wie z. B. die Vermeidung von Emissionen durch Investitionen in neue Technologien kann grundsätzlich als positiv bewertet werden, da ein ausreichend hoher Preis in der kurzen Frist zur Vermeidung der Emissionen führen kann. In der mittleren und langen Frist kann die Suche nach innovativen technologischen Lösungen begünstigt werden (Grimme, 2009). Nach einer Studie der OECD (2010) können solche Innovationsanreize z. B. durch eine Umweltsteuer verstärkt werden. So zeigt sich am Beispiel von Schweden, dass sich der Anteil an neu eingeführten Vermeidungstechnologien nach der Einführung einer NO_x-Steuer deutlich erhöht hat. Folglich hat die Einführung der Steuer den wirtschaftlichen Nutzen dieser Technologien für die Unternehmen verstärkt und den Einsatz somit begünstigt.

Operationelle Instrumente umfassen als dritte große Gruppe der Ansatzpunkte für Emissionsreduktionen generell alle Maßnahmen, die dazu dienen, Betriebsabläufe so zu optimieren, dass klimarelevante Emissionen möglichst reduziert werden. Im Luftverkehr basiert die Flugplanung seitens der Fluggesellschaften – unter Berücksichtigung der von ATM-Betreibern freigegebenen Lufträume - momentan vorrangig auf der Maximierung der Pünktlichkeit und der Minimierung der Betriebskosten. Hingegen wird der Minimierung der negativen Effekte von Treibhausgasen weniger Priorität zugebilligt. Dabei hängen die Auswirkungen von Nicht-CO₂-Emissionen auf das Klima stark von der Höhe und vom Ort der Emissionen ab (z. B. Schumann, 2000; Laci et al., 1990). Eine Änderung der Flughöhe und ein wetterabhängiges Umfliegen von klimasensitiven Regionen könnten folglich sowohl NO_x als auch Kondensstreifen und Zirren deutlich reduzieren. Es muss allerdings berücksichtigt werden, dass die Minimierung von einem Effekt eine Erhöhung eines anderen Effektes nach sich ziehen kann. So können operationelle Maßnahmen diverse Tradeoff-Effekte bezogen auf den Flugbetrieb und die Flugsicherung mit sich bringen: Längere Trajektorien erhöhen auch den Treibstoffverbrauch und somit die Menge an emittiertem CO₂.

Neben der Anpassung der Reiseflughöhe existiert auch noch eine Vielzahl anderer operationeller Maßnahmen, wie z.B. das oft diskutierte Anflugverfahren „Continuous Descent Approach“

(CDA). Bei diesem Gleitanflugverfahren soll durch einen kontinuierlichen Sinkflug ab dem Verlassen der Reiseflughöhe die benötigte Triebwerksleistung reduziert werden. Dies führt ebenso zu einer Verringerung des Treibstoffverbrauchs, des CO₂-Ausstoßes, des Fluglärms und der lokalen Emissionen. Als primär lokales Instrument, welches flughafenbezogen angewandt werden kann, stellt der CDA damit eine positive Ergänzung zu anderen Maßnahmen dar, die auf nationaler und internationaler Ebene genutzt werden können.

4.1.2 Beurteilungskriterien

Im Rahmen dieser Studie wurde eine große Zahl möglicher Instrumente im Hinblick auf ihre Eignung zur Reduzierung des gesamten Klimaeffekts des internationalen Luftverkehrs analysiert, von denen die oben dargestellten nur eine Teilmenge darstellen. Diese Instrumente wurden mit Hilfe der folgenden **qualitativen Beurteilungskriterien** bewertet:

(1) **Ökologische Treffsicherheit:**

Wie sicher lässt sich das Emissionsziel realisieren? An dieser Stelle geht es auch um die Berücksichtigung von Interdependenzen und Tradeoffs.

(2) **Wirkungsgeschwindigkeit:**

Wie schnell erfolgt die Anpassung der Ist-Emissionen an das vorgegebene Emissionsziel?

(3) **Ökonomische Effizienz:**

Kann das angestrebte Emissionsziel unter den gegebenen Rahmenbedingungen zu den geringstmöglichen gesamtwirtschaftlichen Kosten erreicht werden?

(4) **Innovationswirkung:**

Welche Auswirkungen bzw. Anreizwirkungen hat das Instrument auf den technischen Fortschritt in der mittleren und langen Frist?

(5) **Wettbewerbswirkung:**

Welche Wettbewerbswirkungen sind mit den einzelnen Instrumenten verbunden?

(6) **Politische Durchsetzbarkeit:**

Wie wahrscheinlich ist die politische Umsetzung des Instruments? Lässt es sich im gegebenen politischen und gesellschaftlichen Rahmen verwirklichen?

(7) **Administrativer Aufwand:**

Wie hoch ist der administrative Aufwand, der aus der Einführung des jeweiligen Instruments resultiert?

4.1.3 Ergebnisse

Ausgehend von den vorangestellten Überlegungen wurden im Rahmen der vorliegenden Studie unterschiedliche Ausgestaltungsmöglichkeiten der vorab vorgestellten Instrumente analysiert und die besten Optionen hinsichtlich ihrer wirtschaftlichen Effizienz, ihrer ökologischen Vorteile und ihrer Praktikabilität identifiziert. Auf Basis dieser Untersuchungen scheinen aus unserer Sicht marktwirtschaftliche Instrumente wie Abgaben, ein emissionsbezogenes Entgelt und ein Emissionshandel am aussichtsreichsten zu sein, um die Klimaauswirkungen des Luftverkehrs zu begrenzen. Dies liegt vor allem daran, dass im Gegensatz zu ordnungsrechtlichen Ansätzen mithilfe ökonomischer Instrumente klimawirksame Emissionen am kosteneffizientesten gesenkt werden können. Dieses Ziel wird durch ein Preissignal über eine Besteuerung, ein Entgelt oder ein Emissionshandelssystem erreicht. Eine sinnvolle Ergänzung dieser Instrumente kann durch ausgewählte operationelle Maßnahmen erfolgen.

Zudem erfahren marktbasierende Maßnahmen auch bei ICAO CAEP und innerhalb der EU große Beachtung. So wird der Einsatz sog. market-based measures im internationalen Luftverkehr zur Reduktion der CO₂-Emissionen dieses Sektors seit vielen Jahren auf ICAO-Ebene diskutiert. In der EU sowie in Norwegen, Island und Liechtenstein ist der internationale Luftverkehr seit 2009 in das EU Emissionshandelssystem für stationäre Anlagen zur Begrenzung von CO₂-Emissionen integriert (ICAO, 2007; ICAO, 2010b; Council of the European Union, 2009a; Council of the European Union, 2009b). Es kann folglich davon ausgegangen werden, dass Erfahrungen mit der Konzeption und praxisorientierten Ausgestaltung dieser Instrumente vorliegen und eine gewisse Akzeptanz gegeben ist. Im Folgenden werden die Maßnahmen im Detail beschrieben, die sich bei der Analyse als am geeignetsten herausgestellt haben und im weiteren Projektverlauf

berücksichtigt werden. Weiterhin werden Empfehlungen zur konkreten Ausgestaltung der einzelnen Instrumente hinsichtlich ihrer Anwendung in der Praxis unterbreitet.

Tabelle 4-1: Liste der ausgewählten Instrumente

(1) Klimasteuer auf alle klimarelevanten Emissionen des Luftverkehrs
(2) Emissionsabhängige Entgelte auf NO_x-Emissionen kombiniert mit einem CO₂-Zertifikatehandel
(3) Emissionshandel (Emissions Trading Scheme = ETS) auf alle klimarelevanten Emissionen des Luftverkehrs
(4) Operationelle Maßnahmen → klimaoptimale Flugtrajektorien zur Verringerung von Kondensstreifen und Zirren als ergänzende Maßnahmen

Quelle: Eigene Darstellung.

(1) Klimasteuer

Die Klimasteuer soll auf alle klimarelevanten Emissionen des Luftverkehrs erhoben werden. Steuerpflichtig sind alle Luftverkehrsunternehmen, die zu einer gewerblichen Beförderung von Personen berechtigt sind und Flüge durchführen. Die Luftverkehrsunternehmen registrieren sich bei ihrer zuständigen Behörde (z. B. analog zur Luftverkehrssteuer beim Bundesministerium für Finanzen) und protokollieren die Basisdaten zur Berechnung der Steuer (z. B. Kerosinverbrauch, Anzahl der Flüge, Ab- und Ankunftsflughafen, geflogene Strecke, eingesetztes Fluggerät). Diese werden monatlich für den vorangegangenen Kalendermonat an die entsprechende Behörde übermittelt, die darauffolgend die Steuerlast festsetzt. Die Höhe der Steuerlast wird auf Basis der Klimawirksamkeit der tatsächlich emittierten Schadstoffmengen (CO₂, NO_x, H₂O, Kondensstreifen und Zirren) berechnet. Hierzu wird die Klimawirkung der einzelnen Schadstoffe der von einem Luftverkehrsunternehmen durchgeführten Flüge in CO₂-Äquivalente umgerechnet. Zur Berechnung des CO₂-Äquivalents werden – soweit es die Datenlage zulässt – sowohl die klimawirksamen Treibhausgase als auch Kondensstreifen mithilfe von Metriken herangezogen (siehe Kapitel 2). Mithilfe der Metriken ist es möglich, die Klimaauswirkung der nicht-CO₂-Emissionen in Relation zur Klimawirksamkeit von CO₂ zu stellen. Wie bereits in Kapitel 2.2 dargelegt, hängen die Klimawirkungen der einzelnen Gase und damit die zugrunde zulegenden Metriken insbesondere vom jeweils betrachteten Zeithorizont ab. Aufgrund dessen werden alternativ zwei ver-

schiedene Zeithorizonte analysiert: Ein Zeithorizont von 20 sowie 50 Jahren, also atr_{20} sowie atr_{50} . Bei einem relativ kurzen Zeithorizont von 20 Jahren werden die Wirkungen der kurzlebigen Klimagase stärker berücksichtigt. Ein Betrachtungszeitraum von 50 Jahren erlaubt wiederum eine etwas stärkere Gewichtung der Klimawirkung der langlebigeren Gase.

Zusätzlich ist es bei der Konzeption der Klimasteuer wichtig hinsichtlich der Höhen, in denen NO_x emittiert wird zu unterscheiden. Denn die Klimawirksamkeit von NO_x ist - nach heutigem naturwissenschaftlichem Kenntnisstand - in höheren Luftschichten deutlich größer. Hinzu kommt, dass auch die Klimawirkung von NO_x während des Reiseflugs sehr unterschiedlich sein kann, wobei sowohl eine Höhen- als auch eine Breitengradabhängigkeit gegeben ist. Auch der Zeitpunkt der Emission (Tag/Nacht) kann einen Einfluss auf die Klimawirksamkeit haben. Da die Steuerlast der Klimasteuer nachträglich berechnet wird, kann dies anhand der tatsächlich geflogenen Flugroute geschehen und auf diese Weise die Klimawirksamkeit von NO_x bestmöglich berücksichtigen. Modelltechnisch wird dies mithilfe vereinfachender Annahmen umgesetzt, diese betreffen z. B. die jeweiligen Breitengrade der Flugstrecke und den Zeitpunkt der Emission der einzelnen Spezies.

Die Mengen der einzelnen Klimagase, die mit ihrer jeweiligen Klimawirksamkeit gewichtet werden, werden sodann additiv miteinander verknüpft. Als Ergebnis resultiert die Menge an CO_2 -Äquivalenten, die auf den betreffenden Flügen verursacht wurde. Eine Multiplikation mit dem Preis pro Einheit CO_2 -Äquivalent ergibt die Steuerlast für die jeweiligen Flüge.

Diese Vorgehensweise lässt sich formal wie folgt für die Metrik atr_{50} veranschaulichen. Die Metrik atr_{20} lässt sich analog berücksichtigen.

$$climate\ tax = price * \sum_{p \in Flight} CO_{2(p)} + NO_{x(p)} * atr_{50}^{(NO_x)} + H_2O_{(p)} * atr_{50}^{(H_2O)} + dist_{(e)} * atr_{50}^{(cont)}$$

Hierbei bezeichnet $NO_{x(p)}$ diejenigen Mengen an NO_x , die auf den verschiedenen Flughöhen, Längengraden und Breitengraden (gleich Flugposition p) zu bestimmten Zeitpunkten emittiert wurden. Auch die Emissionsarten H_2O , CO_2 und die Kondensstreifen werden nach der Flugposition p differenziert, da auch diese Emissionen mit den Umgebungsbedingungen und der Leistungsanforderung des Triebwerks variieren. Bei der Klimawirkung von CO_2 muss jedoch keine Höhenabhängigkeit berücksichtigt werden. Deshalb erfolgt bei diesem Klimagas keine flugpositionsabhängige Korrektur ($atr_{CO_2,p}$).

Um die Höhe der Steuerlast für einen Flug zu ermitteln, werden zunächst die Mengen der emittierten Gase CO_2 , NO_x , H_2O und die Kondensstreifen differenziert nach Längen- und Breitengrad sowie dem Zeitpunkt der Emission berechnet. Danach wird die emittierte Menge jeder Substanz mit dem entsprechenden Äquivalenzfaktor der zugrunde gelegten Metrik (hier: atr_{50}) multipliziert. An dieser Stelle ist zu beachten, dass jeweils für NO_x , H_2O und die Kondensstreifen in Abhängigkeit von der Flughöhe, dem Längengrad und dem Breitengrad sowie dem Zeitpunkt der Emission unterschiedliche Äquivalenzfaktoren ($\text{atr}_{50(p)}$) verwendet werden. Als Ergebnis ergibt sich das CO_2 -Äquivalent jeder Emissionsspezies bezogen auf die jeweils emittierten Mengen. Zur Festlegung der Steuerlast wird dann die Summe der auf diese Weise errechneten Mengen an CO_2 -Äquivalent mit dem Preis pro Tonne CO_2 -Äquivalent multipliziert. Dieser Preis wird von der Institution festgesetzt, die die Klimasteuer erhebt. Im Rahmen unserer Modellierung werden wir entsprechende Annahmen bezüglich des Preises je Tonne CO_2 -Äquivalent setzen.

Der administrative Aufwand und die Transaktionskosten für die Einführung dieses Instruments können im Vergleich zu anderen Maßnahmen generell als relativ niedrig eingestuft werden, da die vorhandene Infrastruktur zur Steuererhebung genutzt werden kann. Die Steuer kann z. B. durch eine sachlich zuständige Behörde erhoben werden. Darüber hinaus können bereits vorhandene Kontrollmechanismen angewandt werden, so dass der administrative Aufwand überschaubar sein dürfte. Eventuell könnten zusätzliche Kosten seitens der Luftverkehrsgesellschaften anfallen, wenn diese verpflichtet werden, ihre Berechnungsgrundlage zur Feststellung der Steuerlast zertifizieren und regelmäßigen Audits unterziehen zu lassen.

Grundsätzlich bleibt weiterhin festzuhalten, dass eine Steuer generell ein Instrument zur Erzielung von Einnahmen für das öffentlich-rechtliche Gemeinwesen ohne Anspruch auf eine bestimmte staatliche Gegenleistung darstellt. Eine Klimasteuer sollte allerdings vorrangig als Anreizinstrument mit Lenkungswirkung verstanden und genutzt werden, um eine Verringerung des Schadstoffausstoßes zu erreichen. Die Erzielung von Einnahmen steht hier also nicht im Vordergrund. Im Vergleich zu ordnungsrechtlichen Maßnahmen bleibt die Entscheidung, ob und in welchem Umfang die Schadstoffe vermieden werden, daher jedem einzelnen Emittenten selbst überlassen, so dass komplexe Kontrollmechanismen nicht erforderlich sind. Allerdings führt dieser Umstand auch dazu, dass das Erreichen eines bestimmten ökologischen Ziels nicht gewährleistet werden kann. Der Erfolg einer Klimasteuer bleibt vor diesem Hintergrund letztlich von der richtigen Höhe der Besteuerung abhängig. Eine regelmäßige Überprüfung der Steuerhöhe ist damit erforderlich. Bei Bedarf sollte eine Modifizierung erfolgen.

Weiterhin führt eine Steuer allgemein zu einer Erhöhung der Kosten der Steuersubjekte bzw. Steuerpflichtigen. Marktteilnehmer müssen diese Kosten in ihr Preiskalkül mit einbeziehen. Gelingt es dem Marktteilnehmer, den Ausstoß von Treibhausgasen zu reduzieren, kann er die Kosten entsprechend senken. Somit wird mithilfe der Steuer ein ökonomischer Anreiz geschaffen, den Schadstoffausstoß zu reduzieren. Übertragen auf den Luftverkehr werden Fluggesellschaften folglich bei Einführung einer Klimasteuer versuchen, einerseits kurzfristig den Ausstoß dieser Gase zu verringern und andererseits mittel- und langfristig in umweltfreundlichere Fluggeräte zu investieren. Letzteres ist allerdings nur dann möglich, wenn solche Technologien auch verfügbar sind. Um den Schadstoffausstoß und damit die Kosten in kurzer Frist zu reduzieren, können Airlines z. B. versuchen, das Startgewicht ihrer Flugzeuge zu minimieren oder verstärkt ihr umweltfreundlicheres Fluggerät – soweit vorhanden – innerhalb ihrer bestehenden Flotte einzusetzen. Auch die Verringerung des Flugangebots insbesondere auf der Kurzstrecke könnte zu einer Reduzierung des CO₂-Ausstoßes führen, da diese in der Regel im Vergleich zu Langstreckenflügen weniger treibstoffeffizient sind (Scheelhaase, Grimme, Schaefer, 2010). Jedoch hängt eine Umsetzung jeglicher Maßnahmen davon ab, ob hieraus eine Kostenersparnis für die Airline resultiert.

Grundsätzlich kann man Fluggesellschaften als wirtschaftliche Unternehmen definieren, die das Ziel der Gewinnmaximierung verfolgen. Entsprechend werden Fluggesellschaften versuchen, jede Form von Kostenerhöhung an die Nachfrager weiterzugeben. Ökonomisch spricht man hier von einer Überwälzung. Werden die erhöhten Kosten, die durch die Steuer - aber auch durch die anderen klimapolitischen Instrumente - entstehen, auf den Ticket- sowie Frachtpreis aufgeschlagen, kann dies wiederum zu einer Verringerung der Passagier- und Frachtnachfrage führen. Wie die Nachfrage letztlich reagiert, hängt von der sog. Preiselastizität der Nachfrage ab. Diese gibt an, in welchem Umfang sich die nachgefragte Menge eines Gutes ändert, wenn sich der Preis des Gutes um eine Einheit verändert (siehe hierzu detailliert Kapitel 5.4 dieses Berichts). Je niedriger die Preiselastizität ist, desto starrer reagiert die Nachfrage. In diesem Fall würde eine Erhöhung des Preises die Nachfrage nicht oder nur unwesentlich beeinflussen. Dies ist meistens dann der Fall, wenn der Nachfrager nicht auf Substitute ausweichen kann. Insbesondere für Kurzstreckenflüge stellen jedoch sowohl der Schienenverkehr als auch der PKW mögliche Substitute dar. Erweist sich die Preiselastizität in diesem Fall als hoch, wird die mengenmäßige Nachfrage durch die Erhöhung der Preise sinken. Dies hätte wiederum eine Verringerung der angebotenen Flüge zur Folge. Der Hauptzweck der Steuer wäre somit erreicht, da auch auf diese Weise eine Verringerung des Schadstoffausstoßes herbeigeführt wird.

Wie Forsyth (2010) gezeigt hat, werden die Kosten jedoch nicht zwingend an den Passagier weitergegeben. Vielmehr hängt die Kostenweitergabe auch stark von der jeweiligen Marktsituation ab. Grundsätzlich lassen sich drei Marktsituationen unterscheiden: Wettbewerb, Monopol oder Oligopol. Im Luftverkehr ist es sinnvoll, die Marktsituation einzelner Strecken zu definieren, die dann in eine der drei Kategorien eingeordnet werden können: Strecken mit hohem Wettbewerb sind solche, die von einer großen Anzahl von Fluggesellschaften bedient werden. Wird eine Strecke nur von einem Anbieter bedient, liegt ein Monopol vor. Strecken, die nur von zwei bis vier Fluggesellschaften bedient werden, stellen wiederum ein Oligopol dar. So nimmt Forsyth (2010) an, dass in einem Wettbewerbsmarkt alle Kosten der Steuer vollständig auf die Passagiere überwält werden, während die Kostenweitergabe in oligopolistischen und monopolistischen Märkten unter bestimmten Bedingungen wesentlich geringer ausfallen kann. Liegt beispielsweise eine Kapazitätsbeschränkung eines Flughafens vor, ist es wahrscheinlich, dass der Preis nicht erhöht wird.

Auf bestimmten Monopol- oder Oligopolstrecken können jedoch Preise verlangt werden, die nicht nur sämtliche Kosten der Fluggesellschaften decken, sondern auch z. T. erhebliche Gewinnmargen ermöglichen. So betrug beispielsweise der Preis für ein Businessclassticket der Lufthansa im Frühjahr 2008 auf der Strecke Frankfurt – Seattle und retour etwa 5.000 €, hier hatte die Lufthansa ein Monopol. Hingegen kostete die entfernungsmaßig annähernd gleiche Strecke Frankfurt – Vancouver im gleichen Zeitraum bei Air Canada etwa 2.500 €. Air Canada bot diese Strecke im Rahmen eines Code-Sharing-Agreements u. a. zusammen mit Lufthansa an. Hier zeigt sich der Einfluss der Wettbewerbssituation auf die Preisgestaltung, denn anders als bei der Strecke Frankfurt – Seattle wurde die Strecke Frankfurt – Vancouver von mehreren Fluggesellschaften angeboten.

Im Vergleich zu ordnungsrechtlichen Maßnahmen kann also mittels einer Steuer – wie auch durch ein emissionsbezogenes Entgelt oder handelbare Emissionsrechte – ein Umweltziel zu geringeren Vermeidungskosten erreicht werden (Michaelis, 1996). So werden die Grenzvermeidungskosten der Emittenten mittels der Steuer angeglichen, was dazu führt, dass die Schadstoffe schließlich dort vermieden werden, wo dies volkswirtschaftlich betrachtet am kostengünstigsten ist. Um die gesamtwirtschaftlichen Kosten zu ermitteln, müssen allerdings die eventuell zusätzlich anfallenden Transaktionskosten noch hinzugerechnet werden. Im hier betrachteten Fall der Klimasteuer gehen wir in den Staaten, die bereits klimaschützende Maßnahmen wie z. B. ein Emissionshandelssystem (auch) für den Luftverkehr eingeführt haben, von relativ geringen Transaktionskosten aus, da auf vorhandene Expertise z. B. der Finanzämter zurückgegriffen

werden kann. So lässt sich die Kosteneffizienz der Emissionsvermeidung durch eine Klimasteuer dort durchaus als positiv bewerten.

(2) Emissionsabhängige Entgelte

Als zweites betrachtetes Instrument soll im Folgenden die mögliche Ausgestaltung eines Entgelts auf klimarelevante Substanzen, ein sogenanntes emissionsabhängiges Entgelt, diskutiert werden. Dieses könnte z. B. in Form einer en-route Gebühr bzw. eines lokalen Emissionsentgeltes in Kombination mit einem Cruise-NO_x-Entgelt eingeführt werden. Emissionsabhängige Entgelte wie die LTO-NO_x-Entgelte (Landing-and-Take-Off-cycle) werden bereits seit vielen Jahren an einigen europäischen Flughäfen angewendet (siehe hierzu z. B. Scheelhaase (2010)). Das gewählte Instrument zielt in diesem Einsatzbereich hauptsächlich auf die Verbesserung der lokalen Luftqualität ab. An den europäischen Flughäfen werden für die Berechnung der Entgelte ausschließlich die NO_x-Emissionen und die HC-Emissionen, letztere sofern sie einen Grenzwert überschreiten, zu Grunde gelegt, die während der Landung und des Starts von dem jeweiligen Fluggerät emittiert werden. Der Reiseflug bleibt dabei unberücksichtigt. Um jedoch die globalen Auswirkungen des Klimawandels zu reduzieren, ist es notwendig, auch die NO_x-Emissionen des Reiseflugs einzubeziehen (CE Delft, 2008). Dies könnte mithilfe eines Cruise-NO_x-Entgelts vorgenommen werden.

Emissionen im Reiseflug lassen sich über Korrelationsmethoden auf Basis der LTO NO_x-Werte und des LTO-Treibstoffverbrauchs errechnen, wenn man den Treibstoffverbrauch im Reiseflug sowie Flughöhe und Umgebungsbedingungen kennt. Allgemein akzeptierte Korrelationsmethoden gibt es aber nur für Triebwerke mit konventioneller Brennkammertechnologie (die sog. RQL Technologie). Für neue Technologien, wie z. B. die TAPS Brennkammer im GENx Triebwerk der Boeing 787, sind NO_x-Berechnungen im Reiseflug derzeit nur auf Basis detaillierter Simulationsmodelle der entsprechenden Triebwerke möglich und mit hohen Unsicherheiten behaftet.

Bei der Berechnung der NO_x-Emissionen müssen als erster Schritt zunächst die NO_x-Emissionen ermittelt werden, die während des LTO-Zyklus entstehen. Die hierfür nötigen Informationen zu den Emissionsmengen der Triebwerke während dieser Flugphase liefert die ICAO „Aircraft Engine Exhaust Emissions Data Bank“. Diese Datenbank beinhaltet Informationen zu allen Jettriebwerken ab einer bestimmten Größe, die in der Vergangenheit in Produktion gegangen sind und beruht auf den Angaben der Triebwerkshersteller. Entsprechende Daten zu Turbo-proprietriebwer-

ken können der FOI-Datenbank entnommen werden. Basierend auf den LTO-NO_x-Emissionen können die Gesamtemissionen an NO_x mithilfe eines Distanzfaktors, z. B. basierend auf der Großkreisentfernung, und eines Faktors, der die spezifischen NO_x-Emissionen für die gewählte Flugzeugzelle/Triebwerkskombinationen angibt, ermittelt werden (CE Delft, 2008). Bei der modellgestützten Abschätzung der ökologischen und ökonomischen Effekte der im Rahmen von AviClim untersuchten Instrumente wird an dieser Stelle mit vereinfachenden Annahmen gerechnet, um den Modellierungsaufwand in Grenzen zu halten.

Das NO_x-Entgelt wird sowohl auf die NO_x-Emissionen, die während des LTO-Zyklus entstehen als auch auf die NO_x-Emissionen, die während der anderen Flugphasen verursacht werden, erhoben. Um der ursprünglichen Zielsetzung der NO_x-Entgelte, dem Schutz der lokalen Luftqualität, stärker Rechnung zu tragen, werden die NO_x-Emissionen, die in Flughöhen bis 3.000 Fuß emittiert werden, mit dem Faktor 2 multipliziert und mit den jeweiligen atr-Faktoren gewichtet. Der Faktor 2 wurde von den Autoren dieser Studie mit der genannten Zielsetzung gesetzt und beruht nicht auf naturwissenschaftlichen Erkenntnissen über die Auswirkungen lokaler NO_x-Emissionen. Die NO_x-Emissionen, die in Höhen ab 3.000 Fuß verursacht werden, werden hingegen lediglich mit den atr-Faktoren gewichtet, die auch zur Berechnung der Klimasteuer herangezogen werden.

Kombiniert wird das emissionsbezogene NO_x-Entgelt mit einem marktwirtschaftlichen Instrument zur Begrenzung der CO₂-Emissionen, um die wichtigsten klimarelevanten Substanzen zugleich zu regulieren. Dies hat darüber hinaus den Vorteil, dass die Modellierungsergebnisse vergleichbar werden. Im Folgenden wird das emissionsbezogene NO_x-Entgelt mit einem CO₂-Emissionshandel kombiniert. Hierdurch kann untersucht werden, ob ein emissionsbezogenes NO_x-Entgelt mit einem CO₂-Emissionshandel kombiniert werden sollte, wie von einigen Autoren in der Literatur vorgeschlagen (z. B. CE Delft, 2008). Um auch die Kondensstreifen zu begrenzen, werden zusätzlich operationelle Maßnahmen angenommen. Diese Maßnahmen werden im Rahmen der Modellierung mit Hilfe vereinfachender Annahmen rechnerisch berücksichtigt und im Abschnitt „Operationelle Maßnahmen“ näher erläutert.

Analog zur bereits oben diskutierten Steuerlösung kann auch die Höhe des NO_x-Entgeltes mithilfe der Metrik (atr_{20} bzw. atr_{50}) berechnet werden. So werden die Emissionsmengen des LTO-Zyklus und der anderen Flugphasen jeweils mit der jeweiligen flughöhenabhängigen Metrik gewichtet, wobei die NO_x-Emissionen, die bis zu Flughöhen von 3.000 Fuß freigesetzt werden, wie oben erläutert, zusätzlich mit dem Faktor 2 multipliziert werden. Die hieraus resultierenden CO₂-

Äquivalente werden danach addiert. Anschließend wird die Summe der CO₂-Äquivalente mit dem vordefinierten Preis pro Einheit tCO₂-Äquivalent multipliziert. Die Ergebnisse für den CO₂-Emissionshandel werden parallel dazu berechnet und zu den Ergebnissen für das NO_x-Entgelt addiert.

Um die administrativen Kosten möglichst gering zu halten, ist es von Vorteil, wenn möglichst eine bzw. einige wenige Organisationen mit der Erhebung des Entgeltes betraut werden. Je mehr Stellen involviert sind, desto höher gestalten sich die Komplexität und folglich auch die Transaktionskosten. Als administrative Organisation beispielsweise auf EU-Ebene könnte EUROCONTROL die Erhebung des Entgeltes übernehmen (CE Delft, 2008). EUROCONTROL verfügt bereits über die nötige Infrastruktur und Expertise, die auch schon bei der Erhebung der Streckengebühren angewendet wird. Hierbei ist jedoch zu berücksichtigen, dass die emissionsbezogenen Entgelte in Europa bisher von den einzelnen Flughäfen erhoben werden. Folglich muss über einen Wechsel der gebührenerhebenden Stakeholder nachgedacht werden, um das Entgelt praktikabel zu gestalten.

Ähnlich wie die Klimasteuer zielen auch emissionsbezogene Entgelte, die die Emissionen des gesamten Flugs berücksichtigen, darauf ab, die klimaschädigende Emission mit einem Preis zu versehen. Dies geschieht über eine Erhöhung der Betriebskosten der Fluggesellschaften um die Höhe der entsprechenden Entgelte. Analog zur Klimasteuer und zum Emissionshandel werden einerseits das Angebot und die Nachfrage nach Flügen beeinflusst. Mittel- und langfristig soll jedoch auch der Austausch von älterem Fluggerät zugunsten klimafreundlicherer Technologien dazu dienen, die klimarelevanten Emissionen zu reduzieren.

Dazu ist es nötig, dass die Hersteller die Triebwerke so weiterentwickeln, dass sowohl die LTO-NO_x-Emissionen als auch die NO_x-Emissionen, die während der anderen Flugphasen verursacht werden, verringert werden. Hier ist allerdings zu berücksichtigen, dass zur Zeit bei vergleichbarer Brennkammertechnologie ein Trade-off zwischen NO_x und CO₂ existiert (IPCC, 1999). Das bedeutet, dass eine Reduzierung von NO_x-Emissionen mit einem höheren Kraftstoffverbrauch einhergehen kann. Folglich bedeutet dies steigende Kosten für Fluggesellschaften und eine Zunahme der CO₂-Emissionen. Inwieweit die erwünschten Anreize auch umgesetzt werden, hängt also neben der Ausgestaltung des Instruments (insbesondere im Hinblick auf die Höhe des Entgeltes pro emittierter Einheit) somit auch von der zukünftigen technologischen Entwicklung ab.

Bei der Ausgestaltung des beschriebenen Instruments ist zudem zu beachten, wie die Einnahmen durch die Entgelte verwendet werden. Bislang sind die emissionsbezogenen Entgelte aufkommensneutral in dem Sinne ausgestaltet, dass sich die Einnahmen der Flughäfen, die diese Entgelte erheben, nicht erhöhen dürfen. Vielmehr dienen die Einnahmen aus den Emissionsentgelten zu einer Absenkung anderer Flughafenentgelte und werden somit indirekt wieder an die Fluggesellschaften rückerstattet (siehe hierzu z. B. Scheelhaase (2010)). Diese Vorgehensweise lässt sich nicht in identischer Weise auf die im Rahmen dieser Studie konzipierten emissionsbezogenen Landeentgelte übertragen, da Aufkommensneutralität bei national bzw. international geltenden Entgelten nicht auf der Ebene der einzelnen Flughäfen, sondern nur auf nationaler oder internationaler Ebene gewährleistet werden kann.

Soll das Prinzip der Aufkommensneutralität, beispielsweise auf nationaler Ebene beibehalten werden, kann dies auf vielfältige Weise geschehen. So könnten Fluggesellschaften direkte Rückerstattungen erhalten,² die Gelder könnten in Forschung und Entwicklung investiert und/oder für staatliche Klimaprojekte zweckgebunden verwendet werden. Zu diesem Zweck könnte beispielsweise EUROCONTROL als Erhebungsstelle der Entgelte die Einnahmen nach einem definierten Schlüssel, z. B. proportional zu den verkauften Tonnen-Kilometern (RTK) pro Staat, an die EU-Vertragsstaaten zurück verteilen. Auch eine indirekte, nicht zweckgebundene Nutzung der Einnahmen ist denkbar. Allerdings könnte eine solche zweckgebundene Nutzung der Einnahmen z. B. in Form von Investitionen in Forschung und Entwicklung die Wirkungsgeschwindigkeit und -tiefe des beschriebenen Instruments deutlich erhöhen. Die Ausgestaltung der emissionsabhängigen Entgelte beeinflusst also maßgeblich die ökologische Effektivität dieser Maßnahme.

Analog zur Steuerlösung kann die ökonomische Effizienz des beschriebenen Instruments jedoch insgesamt als positiv betrachtet werden. Durch die Zweckbindung der Einnahmen kann darüber hinaus die Wirkungsgeschwindigkeit erhöht werden.

(3) Emissionshandel

Im Gegensatz zu den oben genannten Instrumenten werden bei dem dritten in dieser Studie betrachteten Instrument, dem Emissionshandel, die Emissionen ex ante auf einen vordefinierten

² Eine Rückerstattung an die Flugzeugbetreiber könnte bei einer aufkommensneutralen Ausgestaltung der Entgeltregelung angedacht werden, um z. B. die Betreiber zu entlasten, die Flüge unterhalb des Emissionsdurchschnitts realisieren. Eine solche aufkommensneutrale Ausgestaltung erhöht zwar einerseits die Akzeptanz sei-

Wert begrenzt. Somit kann ein bestimmtes absolutes Emissionsziel durch den Emissionshandel umgesetzt werden, wodurch die ökologische Zielsicherheit im Vergleich zu den beiden oben diskutierten Ansätzen wesentlich erhöht wird.

Das Grundprinzip eines Emissionshandels kann wie folgt beschrieben werden. Zunächst wird die maximal zulässige Emission an klimawirksamen Gasen für einen festgelegten Zeitraum auf einen vordefinierten Wert begrenzt (= cap). In Höhe des sogenannten caps werden anschließend Emissionsrechte ausgegeben. Die Emittenten können diese Rechte frei handeln. Ohne Emissionsrechte dürfen keine Schadstoffe emittiert werden. Der Emissionsausstoß eines jeden Emittenten muss daher an die für ihn verfügbaren Emissionsrechte angepasst werden.

Dies kann zum einen dadurch geschehen, dass der Emittent die Menge der von ihm verursachten Emissionen an die ihm zugeteilte Menge an Emissionsrechten anpasst. Ist dies technisch/operationell nicht möglich, muss der Emittent Emissionsrechte von anderen Emittenten, die Emissionseinsparungen erzielen konnten, hinzukaufen. Gleiches gilt, wenn Einsparungen an Emissionen zwar möglich wären, diese aber mit Kosten verbunden sind, die höher ausfallen würden als Kosten, die durch den Zukauf weiterer Emissionsrechte, entstünden. Auch in diesem Fall würde sich ein unter ökonomischen Gesichtspunkten am Markt agierendes Unternehmen für den Zukauf weiterer Emissionszertifikate entscheiden, da dies die kostengünstigere Lösung darstellt. Der Markt reguliert damit selbstständig die Verteilung der Emissionsrechte unter den in das Modell einbezogenen Emittenten. Die Verteilung selbst kann sich über die Zeit ändern, ebenso wie der Preis für die Emissionszertifikate, der das Verhältnis von Angebot und Nachfrage widerspiegelt. Konstant bleibt jedoch die Menge an ausgestoßenen Emissionen in einem festgelegten Zeitraum, womit der Emissionshandel wie oben dargelegt, die größtmögliche ökologische Zielsicherheit aller im Rahmen dieser Studie untersuchten Instrumente gewährleistet.

Das im Jahr 2009 in Kraft getretene Europäische Emissionshandelssystem (EU-ETS) für den Luftverkehr ermöglicht momentan jedoch noch keine vollständige Berücksichtigung aller Klimaeffekte dieses Sektors, da ausschließlich CO₂-Emissionsrechte gehandelt werden. Wie bereits oben beschrieben, bestehen gewisse Trade-offs zwischen den verursachten Emissionen, z. B. zwischen CO₂ und NO_x. So führt das Fliegen in geringerer Höhe oft zu einem höheren Treibstoffverbrauch, allerdings zu einer geringeren Wirkung von NO_x auf O₃. Unter Umständen könnte eine erhöhte NO_x-Emission in niedrigerer Höhe sogar geringere Klimawirkungen verursachen.

tens der Industrie, andererseits wird die ökologische Effektivität der Maßnahme jedoch stark reduziert (CE Delft, 2008).

In der weiteren Analyse soll ein Emissionshandelsmodell diskutiert werden, das über die CO₂-Emissionen hinaus auch andere klimarelevante Substanzen berücksichtigt. Analog zur Klimasteuer sollen hier alle klimarelevanten Emissionen des Luftverkehrs miteinbezogen werden. Zur Berechnung der Klimawirkung der einbezogenen Gase kann die Methodik angewendet werden, die bereits bei der Klimasteuer vorgestellt wurde. Die Höchstgrenze (cap) der luftverkehrsspezifischen klimawirksamen Emissionen wird in identischer Weise auf der Basis von vergangenheitsbezogenen Emissionsmengen definiert. Ähnlich wie im Rahmen des EU ETS wird das cap auf historische luftverkehrsspezifische Emissionen bezogen, hier jedoch auf die historischen klimarelevanten Emissionen des Jahres 2010 aller am Emissionshandel teilnehmenden Fluggesellschaften. Da von einem kontinuierlichen, wenn auch regional unterschiedlichem Wachstum des Luftverkehrs im Zeitraum 2011 – 2030 ausgegangen werden kann (vgl. hierzu z. B. Airbus (2011)), und die Emissionsvermeidung im Luftverkehr zumeist mit sehr hohen Kosten verbunden ist, spricht vieles für eine im Zeitablauf steigende Nachfrage nach Emissionsrechten.

Alternativ zu einem Emissionshandelssystem auf alle klimarelevanten Emissionen des Luftverkehrs wird ein Emissionshandelssystem, das ausschließlich die CO₂-Emissionen des Luftverkehrs reguliert eingeführt, das jedoch ausschließlich beim Instrument der NO_x-Entgelte Anwendung findet. Wie im Abschnitt „Emissionsbezogene Entgelte“ bereits beschrieben, soll das CO₂-Emissionshandelssystem mit den NO_x-Entgelten kombiniert werden, um die wichtigsten klimarelevanten Emissionen des Luftverkehrs zugleich regulieren zu können.

Im Hinblick auf den administrativen Aufwand, der aus der beschriebenen Integration weiterer klimarelevanter Gase in ein Emissionshandelssystem für den Luftverkehr zu erwarten wäre, spricht kein gewichtiger Grund gegen eine Integration dieser Gase. Die Erfahrungen und die vorhandene Infrastruktur können bei denjenigen Staaten, die den Luftverkehr bereits in den Emissionshandel integriert haben (z. B. im Rahmen des EU ETS sowie im neuseeländischen ETS), genutzt werden, um die zusätzlichen Emissionsrechte zu verwalten. Das Hauptproblem bei der Integration zusätzlicher klimarelevanter Gase ist, welche Metrik verwendet werden soll und vor allem auch welcher Zeithorizont. Dieses Problem wurde, wie oben dargelegt, mithilfe der Verwendung alternativer Metriken, die verschiedene Zeithorizonte berücksichtigen, bestmöglich behoben.

Weiterhin bleibt zu betonen, dass es das Hauptziel der hier diskutierten Maßnahme ist, die Klimaeffekte von Triebwerksemissionen sowohl seitens der Fluggesellschaften – durch den Einsatz klimafreundlicher Flugzeug / Triebwerkskombinationen – als auch seitens der Triebwerks-

hersteller – durch die Entwicklung von Triebwerken mit minimalen Klimaeffekten – zu reduzieren. Wie bereits im Rahmen der Ausführungen zu der Klimasteuer und der emissionsabhängigen Entgelte beschrieben, erfolgt auch bei einem Emissionshandelssystem eine zumindest teilweise Internalisierung der externen Kosten. Allerdings wird der Preis bei diesem umweltökonomischen Instrument nicht vorgegeben, sondern am Markt autonom – wie weiter oben erörtert – durch Angebot und Nachfrage bestimmt.

Wie hoch insgesamt der Anreiz Emissionen einzusparen als auch die ökonomische Effizienz des Emissionshandels generell ist, hängt letztlich stark von der Ausgestaltung der Erstverteilung der Emissionsrechte und der Höhe des Marktpreises für diese Rechte ab. Je nach Erstallokationsmethode erhöht bzw. verringert sich die finanzielle Belastung der Marktteilnehmer (CE Delft, 2005). Generell können in diesem Zusammenhang folgende Erstausrüstungsoptionen der Emissionsrechte unterschieden werden, die auch miteinander kombiniert werden können:

(1) *Erstausrüstung basierend auf historischen Emissionen (= Grandfathering)*

Hierbei werden die Emissionsrechte kostenfrei basierend auf historischen Emissionswerten an die jeweilige Fluggesellschaft ausgegeben. Vorteil dieser Variante ist, dass die Akzeptanz seitens der etablierten Airlines sehr hoch sein dürfte, da sie zunächst nicht für die Zertifikate bezahlen müssen. Darüber hinaus kann ihre Planungssicherheit als groß bezeichnet werden. Von Nachteil ist jedoch, dass eine solche Zuteilung die ökonomische Effizienz vermindert, da die Rechte nicht an den Meistbietenden vergeben werden bzw. die am Markt vorhandene Zahlungsbereitschaft ggf. nicht voll ausgeschöpft wird. Zum anderen können Wettbewerbsverzerrungen resultieren, da die etablierten Fluggesellschaften die Emissionsrechte kostenfrei zugeteilt bekommen, während neu eintretende Luftverkehrsunternehmen die benötigten Emissionsrechte am Markt erwerben müssen (CE Delft, 2005). Beim derzeit geltenden EU ETS für den Luftverkehr wird ein (teilweises) Grandfathering angewendet: Im Rahmen des EU ETS werden 85% der insgesamt für den Luftverkehrssektor geschaffenen Emissionsrechte gratis vergeben.

(2) *Auktion*

Aus ökonomischer Sicht ist eine Auktion eine höchst effiziente Variante der Erstausrüstung von Unternehmen mit Emissionsrechten, da hier alle Rechte unmittelbar mit einem entsprechenden Preis versehen werden. Die Auktion schafft durch das Setzen von Preissignalen Transparenz und dient der Effizienz des Marktes (Böhringer und Lange, 2012). Andererseits ist die Akzeptanz dieser Verfahrensweise aus der Perspektive von Luftverkehrsunternehmen eher als gering einzuschätzen, da die finanzielle Belastung für die Un-

ternehmen bei einer vollständigen Auktionierung sehr hoch ausfallen würde. Zudem würden die Fluggesellschaften benachteiligt, die mit weniger liquiden Mitteln ausgestattet sind als die großen ‚global player‘, die sich über Jahre durch Economies of scale und ähnliche Effekte eine stabile Kapitalgrundlage erwirtschaften konnten. Die zu erwartenden Einnahmen aus einer solchen Auktion wären allerdings beträchtlich. Sie könnten prinzipiell dazu genutzt werden, anderweitig Steuern zu senken oder zweckgebunden in Klimaprojekte zu investieren. Alternativ wäre auch eine anteilige Rückerstattung an die Luftverkehrsgesellschaften möglich, wie bereits oben im Rahmen der emissionsabhängigen Entgelte beschrieben (CE Delft, 2005).

Im Lichte der beschriebenen Vor- und Nachteile der verschiedenen Erstausrüstungsmöglichkeiten wurde sich dafür entschieden anzunehmen, dass die Emissionsrechte ähnlich wie im EU ETS zu 85 % gratis vergeben (Grandfathering) und die verbleibenden 15 % im Rahmen von Auktionen versteigert werden sollen. Die Gratiszuteilung der Emissionsrechte erfolgt mit Hilfe eines Benchmarkverfahrens, das in Kapitel 5.3.2 näher beschrieben wird. Diese Vorgehensweise dürfte sowohl die politische Durchsetzbarkeit als auch die Akzeptanz des Emissionshandelssystems seitens der Fluggesellschaften erhöhen. Gleichzeitig wird durch die Auktionierung unmittelbar ein Preissignal gesetzt. Dies erhöht die ökonomische Effizienz des Emissionshandelsmodells.

Im Rahmen des EU-ETS wird das Grandfathering mit Hilfe eines Benchmarkverfahrens umgesetzt: So wurden die durchschnittlichen CO₂-Emissionen aller am Emissionshandel teilnehmenden Fluggesellschaften der Jahre 2004 – 2006 ihren gemeldeten Tonnenkilometern des Jahres 2010 gegenübergestellt. Der auf diese Weise errechnete Benchmark spiegelt die CO₂-Intensität der am Emissionshandel teilnehmenden Fluggesellschaften wider. Mit Hilfe dieses Benchmarks wird die Gratisvergabe der Emissionsrechte an jede Fluggesellschaft berechnet. Diese Vorgehensweise begünstigt solche Fluggesellschaften, die neuere und klimafreundliche Fluggeräte betreiben, so dass ein frühes und ökologisches Agieren entsprechend honoriert wird (CE Delft, 2005). Damit liefert die Benchmark-Methode einen hohen Anreiz, frühzeitig in neue Technologien zu investieren. Jedoch ist der Prozess zur Festsetzung der gemeldeten Tonnenkilometern des Basisjahres (2010) für jede einzelne Fluggesellschaft, wie die Erfahrungen aus dem EU ETS zeigen, mit einer hohen Komplexität und hohen Transaktionskosten verbunden.

Insgesamt bleibt festzuhalten, dass der Emissionshandel neben der hohen ökologischen Treffsicherheit auch aus ökonomischer Sicht viele Vorteile bietet. So ermöglicht dieses Instrument generell die Verringerung von klimaschädlichen Substanzen zu gesamtwirtschaftlich niedrigsten

Kosten, da Emissionsvermeidungsmaßnahmen dort umgesetzt werden, wo sie am kosteneffizientesten sind. Der Grad der ökonomischen Effizienz ist jedoch wiederum abhängig von der Ausgestaltung des Systems. So besteht grundsätzlich die Möglichkeit sowohl von geschlossenen Handelssystemen, in denen der Handel von Rechten bzw. Zertifikaten nur innerhalb der Branche erlaubt ist, als auch von offenen Systemen, bei denen der branchenübergreifende Handel erlaubt und gewünscht ist.

Ein offenes Emissionshandelssystem hat vor diesem Hintergrund den Vorteil, dass die Teilnehmer unterschiedlicher Sektoren hier miteinander handeln können. Im Luftverkehr sind die Vermeidungskosten von Emissionen im Vergleich zu anderen Sektoren sehr hoch (CE Delft, 2005). Fluggesellschaften haben daher in einem offenen System die günstigere Ausgangslage, dass sie Zertifikate aus anderen Sektoren erwerben können, die in der Lage sind, Emissionen zu wesentlich geringeren Kosten zu vermeiden. Dies ist sowohl von Vorteil für die Fluggesellschaften, da sie sich kostengünstig an Klimaschutzanstrengungen beteiligen können, als auch für die anderen Sektoren. Denn Letztere enthalten Einnahmen, die direkt in weitere Maßnahmen zur Schadstoffreduzierung investiert werden können. Auf Basis dieser Überlegungen wird ein offenes Emissionshandelssystem für den Luftverkehr angenommen, in das andere Sektoren bereits integriert sind, wie z. B. im EU ETS System. Eine geographische Differenzierung des Geltungsbereichs des Emissionshandelssystems erfolgt im Rahmen der geopolitischen Szenarien, die im folgenden Kapitel beschrieben werden.

Das im Rahmen von AviClim angenommene Emissionshandelssystem setzt bei den Verursachern von klimarelevanten Emissionen und damit bei den Betreibern von Flugzeugen an. Eine andere Möglichkeit wäre, nicht die Emittenten, sondern die Händler von Brennstoffen auf fossiler Basis (Kohle, Erdöl, Erdgas, Benzin, Diesel und Kerosin) zertifikatpflichtig zu machen.

Ein solcher Ansatz wurde in der Literatur unter anderem bereits von Scheelhaase (1994) für die stationären Emissionsquellen in der EU vorgeschlagen. In Neuseeland wurde dieser Ansatz im Rahmen des nationalen Emissionshandelssystems im Jahr 2008 umgesetzt. Dort sind nicht die Emittenten im Verkehrssystem zertifikatpflichtig, sondern die Importeure und Händler von Treibstoffen für den Verkehrssektor („liquid fuels sector“). Auch Kerosin für den inländischen Luftverkehr wird auf diese Weise in den nationalen Emissionshandel miteinbezogen. Die Importeure und Händler dieser Treibstoffe sollen die Kosten für Emissionsrechte auf die Nachfrager überwälzen, die auf diese Weise ein Preissignal zur Emissionsreduktion erhalten. So werden beispielsweise die neuseeländischen Fluggesellschaften in den Emissionshandel integriert. Ein ähnli-

ches Modell wurde vor einigen Jahren auch für die USA auf politischer Ebene diskutiert (ACESA, 2009).

Der Vorteil dieses sog. ‚Upstream‘-Ansatzes besteht in der administrativen Vereinfachung der Prozesse im Rahmen eines Emissionshandelsmodells: Nicht die Vielzahl an kleineren und größeren Emittenten beispielsweise im Verkehrssektor ist zertifikatpflichtig, sondern eine relativ überschaubare Gruppe von Unternehmen, die sich verhältnismäßig einfach kontrollieren lässt. Auch auf Seiten der Unternehmen bieten sich deutliche Vorteile, da die Zahl der Unternehmen, die zum Erwerb und zum Nachweis von Emissionsrechten verpflichtet ist, weitaus geringer ist.

Diesen Vorteilen stehen jedoch auch Nachteile gegenüber: Erstens haben die Händler und Importeure von Brennstoffen prinzipiell keine Anreize, Emissionen zu vermeiden, da sie fossile Brennstoffe nicht energetisch nutzen, sondern lediglich damit handeln. Insofern können die ökonomischen Anreize zur Emissionsvermeidung im Rahmen eines solchen Modells nur indirekt zum Tragen kommen. Zweitens ist unklar, in welcher Weise die Brennstoffhändler die Kosten für die Emissionsrechte an die Nachfrager überwälzen werden. Hier sind verschiedene Möglichkeiten denkbar, die vom Geschäftsmodell der Brennstoffhändler und den Preiselastizitäten der Brennstoffnachfrager abhängen. Die Preiselastizität der Nachfrage gibt an, in welchem Umfang sich die nachgefragten Mengen ändern, wenn der Preis um eine Einheit geändert wird. Entsprechend determiniert die Preiselastizität der Nachfrage die Überwälzungsmöglichkeiten. Preiselastizitäten lassen sich produktbezogen nur empirisch ermitteln.

Im Prinzip sind viele Möglichkeiten der Überwälzung denkbar, die von einer geraden und vollständigen Überwälzung, d. h. das zertifikatpflichtige Produkt wird vollständig mit seinen Kosten für Emissionsrechte belastet, bis hin zur Möglichkeit reichen, dass der Preis für das betreffende Produkt auch nach Einführung des Emissionshandels unverändert bleibt. Im letztgenannten Fall würden die Kosten für Emissionsrechte entweder auf andere Produkte überwälzt, z. B. könnte der Kohlepreis statt dem Kerosinpreis steigen – ökonomisch spricht man hier von einer schrägen Überwälzung - , oder der Brennstoffhändler würde geringere Gewinne hinnehmen (müssen). Auch ist denkbar, dass die Brennstoffhändler versuchen werden, die Opportunitätskosten für gratis erhaltene und selbst genutzte Emissionsrechte an die Nachfrager weiterzugeben. Opportunitätskosten sind in diesem Zusammenhang entgangene Erlöse, die dadurch entstehen, dass vorhandene alternative Möglichkeiten (Opportunitäten) zur Nutzung von Emissionsrechten, hierunter fällt z. B. der Verkauf von Emissionsrechten, nicht wahrgenommen werden. Dies ist beispielsweise im Rahmen des EU-ETS durch die Anbieter von Elektrizität geschehen. Diese Unter-

nehmen erhöhten die Strompreise mit der Begründung der durch den EU-Emissionshandel erhöhten Kosten, obwohl sie die erforderlichen Emissionsrechte gratis erhalten hatten.

Da die empirischen Befunde zu den Preiselastizitäten im Verkehrsbereich relativ unsicher sind (siehe auch Kapitel 5 dieses Berichts) und die Kostenweitergabestrategien der Brennstoffhändler schwer zu prognostizieren sind, ist die Wirkungsweise eines Upstream-Emissionshandelssystems somit vergleichsweise schlecht vorhersehbar.

Vor dem Hintergrund der beschriebenen Nachteile eines Upstream-Modells wurde sich dafür entschieden, diesen Ansatz im Rahmen von AviClim nicht weiter zu verfolgen. Vielmehr gehen wir, wie oben bereits dargelegt, davon aus, dass die Emittenten der klimarelevanten Gase im Luftverkehr zertifikatpflichtig sind. Ein solches System dürfte sich angesichts der Ausgestaltung der bisher umgesetzten und zukünftig geplanten Emissionshandelsmodelle darüber hinaus der relativ größten Akzeptanz erfreuen. Sowohl das EU-ETS als auch die in China und Südkorea geplanten Emissionshandelssysteme setzen an den Emissionen an und verpflichten dementsprechend die Emittenten dazu, am Emissionshandel teilzunehmen (Scheelhaase, 2014). Auch der internationale Luftverkehrsverband IATA, in dem nahezu alle Fluggesellschaften organisiert sind, äußerte sich in dieser Hinsicht positiv und sprach sich prinzipiell für den Ansatzpunkt der Zertifikatpflicht bei den Fluggesellschaften aus (Haag, 2013).

(4) Operationelle Maßnahmen

Operationelle Maßnahmen stellen das vierte in dieser Studie betrachtete Instrument dar. In der Literatur werden bereits seit geraumer Zeit klimaoptimierte Trajektorien – insbesondere die Änderung der Reise Flughöhe – intensiv diskutiert (Gierens, 2008; Fichter, 2009, Koch et al., 2012; Dahlmann, 2012; Williams et al., 2002; Williams et al., 2003). Mithilfe von bereits geringen Veränderungen der Flughöhe können nicht nur die Entwicklung von Kondensstreifen, sondern auch die Klimawirkungen weiterer nicht-CO₂-Emissionen beeinflusst werden. Die Bildung von Kondensstreifen und Zirren als auch ihre Lebensdauer ist abhängig von den jeweiligen atmosphärischen Gegebenheiten. Kühle Atmosphärenschichten in einem Bereich von 7.000 bis 9.000 m tragen zu der Entstehung von Kondensstreifen bei (Fichter et al., 2009). Unter ungünstigen Umständen verbleiben Kondensstreifen über einen längeren Zeitraum dort und verlieren ihre Linienförmigkeit, so dass Kondensstreifen-Zirren entstehen (Burkhardt und Kärcher, 2011). Um die Klimawirkung von Flugtrajektorien zu reduzieren, können entweder klimatische Durchschnitts-

werte oder tatsächliche Wetterdaten bei der Flugplanung zugrunde gelegt werden. Die Optimierung von wetterabhängigen Trajektorien ist insbesondere bei einer kurzfristigen Flugplanung und Anpassung der Flugroute während des Fluges sinnvoll. Allerdings unterstützt diese Art der Herangehensweise langfristige technologische Anpassungen, d.h. Änderungen des Flugzeugdesign oder -technologie, nur indirekt (Koch et al., 2012).

Der Vorteil dieses Ansatzes ist, dass durch eine Anpassung der Reiseflughöhe die Gesamtklimawirkung minimiert werden kann. Es ist jedoch zu beachten, dass ein solches Verfahren auch zu unerwünschten Nebenwirkungen führen kann. Aus ökonomischer Sicht könnte dieses Verfahren längere Flugzeiten bedeuten. Zum einen erhöht dies ggf. die Kosten der Fluggesellschaften, da Personal und Umlaufplanung angepasst werden muss, und zum anderen wird der Reisekomfort für die Passagiere herabgesetzt (Williams und Noland, 2005). Darüber hinaus kann das Flugzeug aufgrund einer suboptimalen Flughöhe ggf. nicht kosteneffizient betrieben werden, da sich der Treibstoffverbrauch und somit die Kosten für die Fluggesellschaften erhöhen. Dies würde auch eine Erhöhung der CO₂-Emissionen mit sich bringen, was wiederum einen negativen Einfluss auf die Klimawirkung mit sich bringt. Aus diesem Grunde werden in der Wissenschaft bereits angepasste Flugzeugentwürfe diskutiert. Dabei könnten neu entwickelte Flugzeuge so ausgelegt werden, dass sie optimal für „klimafreundliche“, d. h. flexible Flugbetriebsbedingungen, geeignet sind. Die Analyse des Average Temperature Response (ATR) ermöglicht es im Rahmen des Flugzeugentwurfs, diese spezifischen Trade-off-Effekte einzelner Emissionen einzubeziehen. Das Ergebnis einer solchen Herangehensweise soll eine ausgewogene Bewertung des gesamten Klimaeffekts gewährleisten.

Es zeigt sich, dass es wichtig ist, betriebliche, gesamtwirtschaftliche und ökologische Aspekte bei der Bewertung von optimierten Trajektorien mit einfließen zu lassen. Das EU-Projekt REACT4C führt hierzu eine Machbarkeitsstudie im Hinblick auf Flughöhen und Flugrouten durch, die zur Verringerung von Umweltbelastungen beitragen. In REACT4C wird versucht, klimasensitive Regionen, die vom aktuellen Wetter abhängen, entweder durch Änderungen der Reiseflughöhen oder durch horizontales ‚Ausweichen‘ zu umfliegen.

Im Rahmen von AviClim werden operationelle Maßnahmen zur Vermeidung von Kondensstreifen, wie bereits erwähnt, mit NO_x-Entgelten und einem CO₂-Emissionshandel für den Luftverkehr kombiniert. Mögliche Tradeoffs werden dabei bestmöglich berücksichtigt.

4.2 Konzeption der geopolitischen Szenarien

Die oben ausgewählten umweltökonomischen und operationellen Instrumente bzw. Maßnahmen werden mit alternativen Szenarien kombiniert, die einen Korridor möglicher zukünftiger Entwicklungen aufzeigen. Üblicherweise werden in der Literatur Szenarien formuliert und untersucht, die sich durch sehr unterschiedliche Annahmen zu den ökonomischen, technologischen und politischen Entwicklungen unterscheiden. Beispielsweise werden hier alternative Annahmen zum ökonomischen Wachstum der betrachteten Volkswirtschaften und des Luftverkehrssektors, zu Entwicklungen im Bereich Triebwerkstechnik sowie zur Verfügbarkeit wichtiger Ressourcen wie z. B. Erdöl formuliert. So z. B. in einer Studie von PriceWaterhouseCoopers (2005) sowie IVL (2007). Im Unterschied dazu werden im Rahmen von AviClim Szenarien formuliert, die sich (lediglich) hinsichtlich des Ausmaßes der Implementierung klimaschützender Maßnahmen in verschiedenen Staaten bzw. Staatengruppen der Welt unterscheiden.

Dies geschieht vor dem Hintergrund, dass AviClim untersuchen soll, welche klimaschützenden und ökonomischen Effekte je nach Umfang der internationalen Akzeptanz klimapolitischer Maßnahmen im Luftverkehr zu erwarten sind. Auf dieser Basis können dann Empfehlungen für die Verhandlungen bei ICAO- und UNFCCC/Conference of the Parties (COP)-Versammlungen gegeben werden. Gleichzeitig spiegelt die hier gewählte Form der Szenarienformulierung die Realitäten der Diskussionen auf ICAO- und UNFCCC-Ebene wider: In aller Regel sind es Staaten bzw. Staatengruppen, die sich für oder gegen die Umsetzung bestimmter klimapolitischer Vorschläge aussprechen. So konnte beispielsweise im Rahmen der 15. Conference of the Parties in Kopenhagen im Jahr 2009 u. a. auch deswegen kein globales Treibhausgasreduktionsziel vereinbart werden, weil eine Reihe von Entwicklungsstaaten wie Tuvalu, Sudan, Bolivien und Venezuela ihre Zustimmung verweigerten. Dies geschah, weil das vorgeschlagene Reduktionsziel aus Sicht dieser Staaten nicht ambitioniert genug war (vgl. hierzu z. B. Euronews, 2009).

Die im Rahmen von AviClim gewählte Gestaltung der Szenarien ermöglicht darüber hinaus trennschärfere und nachvollziehbarere Ergebnisse, da hier lediglich eine Variable variiert wird und nicht ein ganzes Bündel von möglichen Einflussfaktoren, was manchmal zu einer gewissen Beliebigkeit der Ergebnisse führt.

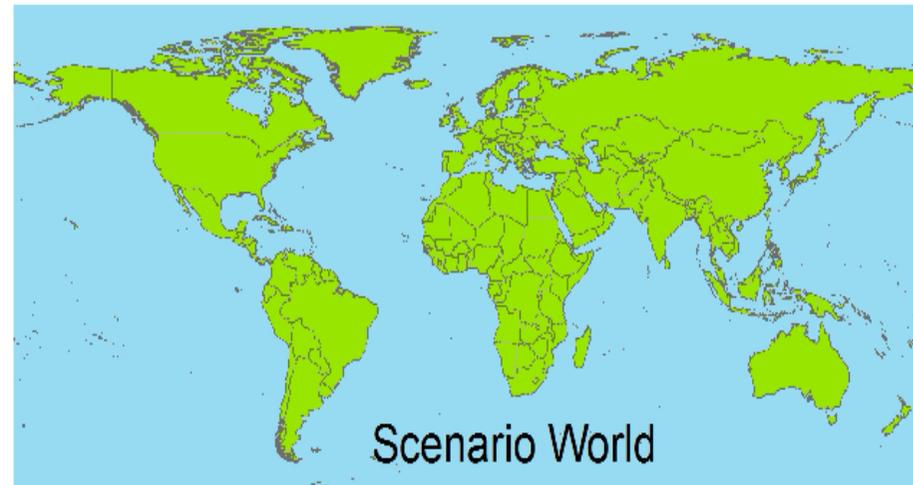
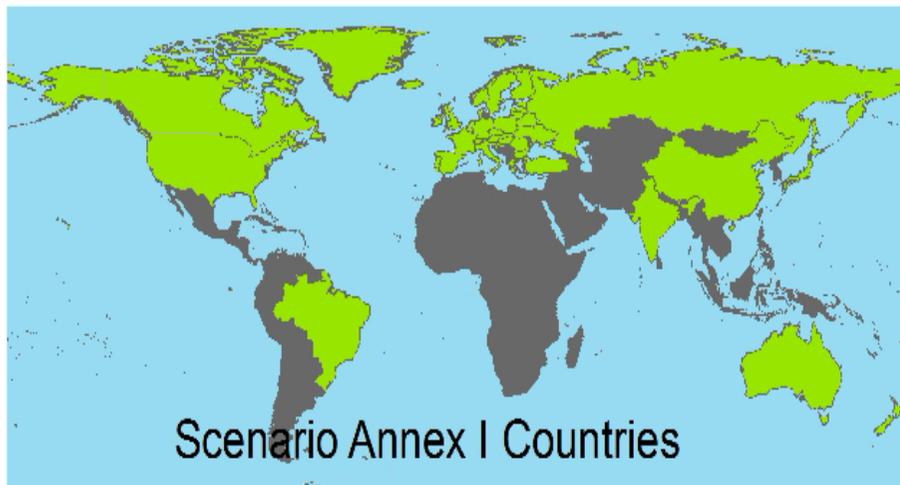
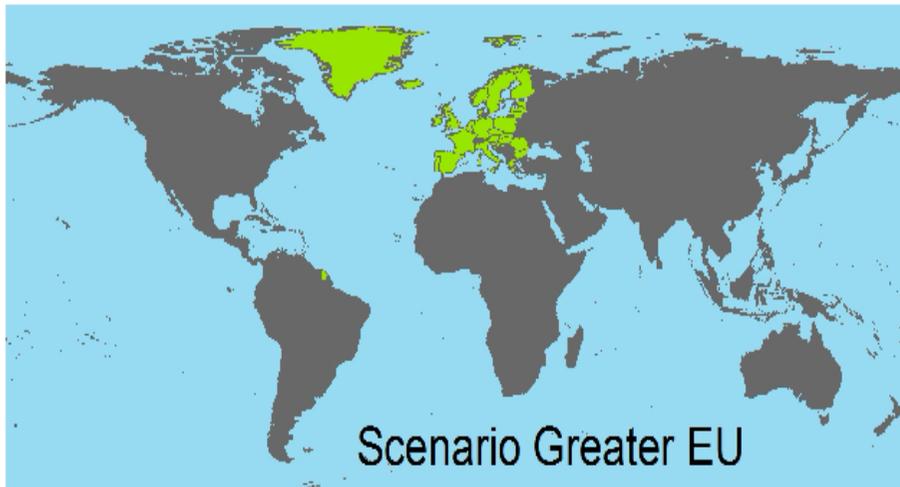
Auf der Basis dieser Überlegungen werden die folgenden vier geopolitischen Szenarien für die nachfolgende Analyse im Rahmen von AviClim formuliert:

1. Einführung der ausgewählten politischen Maßnahmen bzw. Instrumente zum Klimaschutz im Luftverkehr nur in den EU-Mitgliedsstaaten plus Norwegen, Island und Liechtenstein, nicht aber im Rest der Welt. Dieses Szenario entspricht in etwa der heutigen internationalen Unterstützung des EU-Emissionshandels für den Luftverkehr. Dies kristallisierte sich z. B. im Rahmen der 36. und 37. ICAO-Generalversammlung in den Jahren 2007 und 2010 heraus (ICAO, 2007 und 2010b). Dieses Szenario wird im Folgenden als „Greater EU“ Szenario bezeichnet.
2. Realisierung dieser klimaschützenden Instrumente bzw. Maßnahmen wie in Szenario „Greater EU“ plus in der Schweiz, den USA, Kanada, Südkorea, Japan, Singapur, Russland, Australien, Indien, China, Brasilien und in den Golfstaaten. Damit würden Europa und die wichtigsten außereuropäischen Akteure im internationalen Luftverkehr zu den Unterstützerstaaten gehören, wie die nachfolgende Tabelle 4-2 belegt. Dieses Szenario wird im folgenden Text „Great Aviation Countries“ Szenario genannt.
3. Einführung der klimaschützenden Maßnahmen bzw. Instrumente in allen Annex-I-Staaten plus Brasilien, Russland, Indien und China (sog. BRIC-Staaten), nicht aber in den übrigen Entwicklungs- und Schwellenländern. Dieses Szenario nimmt an, dass die ökonomisch und emissionsseitig wichtigsten Staaten der Welt Klimaschutz im Luftverkehr betreiben. Dieses Szenario wird im Folgenden „Annex-I Countries“ Szenario genannt.
4. Weltweite Einführung der klimaschützenden Maßnahmen bzw. Instrumente im Luftverkehr. Dieses Szenario zeigt das klimaschützende Potential, das mit einer globalen Umsetzung der jeweiligen Maßnahme verbunden ist. Entsprechend wird dieses Szenario „World“ genannt.

Um sowohl den inländischen als auch den internationalen Luftverkehr zu adressieren, wird angenommen, dass alle Luftverkehre innerhalb der jeweils betrachteten Staatengruppen sowie von und nach diesen Staatengruppen von den jeweils untersuchten klimaschützenden Maßnahmen betroffen sein werden.

Die folgende Abbildung visualisiert die geopolitischen Szenarien, die im Rahmen von AviClim untersucht werden noch einmal graphisch.

Abbildung 4-2: AviClim-Szenarien im Überblick



Quelle: Eigene Darstellung.

Tabelle 4-2: ICAO-Ranking der Staaten nach Anteil der von ihren Fluggesellschaften durchgeführten geplanten Luftverkehre in den Jahren 2008, 2009 und 2010

Country or group of countries	Total operations: passengers, freight and mail					
	Rank number in 2010	TKT in 2010 in million	Rank number in 2009	TKT in 2009 in million	Rank number in 2008	TKT in 2008 in million
United States	1	156 286	1	147 819	1	157 072
China ¹⁾	2	69 737	2	58 310	2	55 428
Germany	3	29 518	3	27 097	3	30 074
United Arab Emirates	4	28 347	5	21 822	7	19 337
United Kingdom	5	23 650	4	23 449	4	24 101
Republic of Korea	6	21 175	8	16 059	8	16 283
Japan	7	20 401	7	18 170	6	20 458
France	8	19 543	6	19 031	5	20 982
Singapore	9	14 788	10	12 973	9	15 902
Netherlands	10	13 845	9	13 112	10	14 306
Russian Federation	11	13 474	13	9 918	13	10 669
Canada	12	13 144	11	11 904	12	12 243
Australia	13	11 388	12	11 652	11	12 645
India	14	10 578	14	8 942	15	8 503
Brazil	15	10 451	17	7 364	17	6 798
Total for 190 ICAO Member States		603 031		531 260		555 320
Countries 1-15 percentage of total		75.7		76.7		76.5

Quelle: ICAO (2009b, 2010a, 2011). 1) including Hong Kong SAR and Macao SAR. TKT = Total Tonne Kilometres.

Verglichen werden diese vier geopolitischen Szenarien mit einer Business-as-usual-Entwicklung. Dem Business-as-usual-Szenario liegt die Annahme zugrunde, dass die bis zum Jahr 2012 in verschiedenen Staaten der Welt eingeführten Maßnahmen zum Klimaschutz im Luftverkehr auch weiterhin Anwendung finden (vgl. hierzu z. B. Scheelhaase, 2011), aber keine zusätzlichen

Instrumente bzw. Maßnahmen hinzukommen werden. Zusätzliche spezifische Einsparungen von klimarelevanten Emissionen im Luftverkehr resultieren im Business-as-usual-Szenario folglich nur durch den ohnehin stattfindenden (sog. autonomen) technischen Fortschritt in Höhe von 1 – 1,5 % p. a. bezogen auf den spezifischen Treibstoffverbrauch.

Im nächsten Arbeitsschritt werden die ausgewählten politischen Instrumente bzw. Maßnahmen mit diesen Szenarien kombiniert. Wie dies geschieht, verdeutlicht die nachfolgende Tabelle.

Tabelle 4-3: AviClim Untersuchungsansatz im Überblick

Reduktionsinstrument/ Maßnahme	Szenario „Greater EU“	Szenario „Great Aviation Countries“	Szenario „Annex-I- Countries“	Szenario „World“
Klimasteuer	<i>Ökologische und ökonomische Effekte?</i>	<i>Ökologische und ökonomische Effek- te?</i>	<i>Ökologische und ökonomische Effekte?</i>	<i>Ökologische und ökonomische Effekte?</i>
NO _x -Entgelte plus CO ₂ - Emissionshandel plus operationelle Maßnah- men	<i>Ökologische und ökonomische Effekte?</i>	<i>Ökologische und ökonomische Effek- te?</i>	<i>Ökologische und ökonomische Effekte?</i>	<i>Ökologische und ökonomische Effekte?</i>
Emissionshandel auf alle klimarelevanten Emissionen	<i>Ökologische und ökonomische Effekte?</i>	<i>Ökologische und ökonomische Effek- te?</i>	<i>Ökologische und ökonomische Effekte?</i>	<i>Ökologische und ökonomische Effekte?</i>

Quelle: Eigene Darstellung.

5 Modellierungsergebnisse: Modellkette, Kosten und Nachfrageeffekte der klimapolitischen Maßnahmen

5.1 Übersicht über die angewandte Modellkette

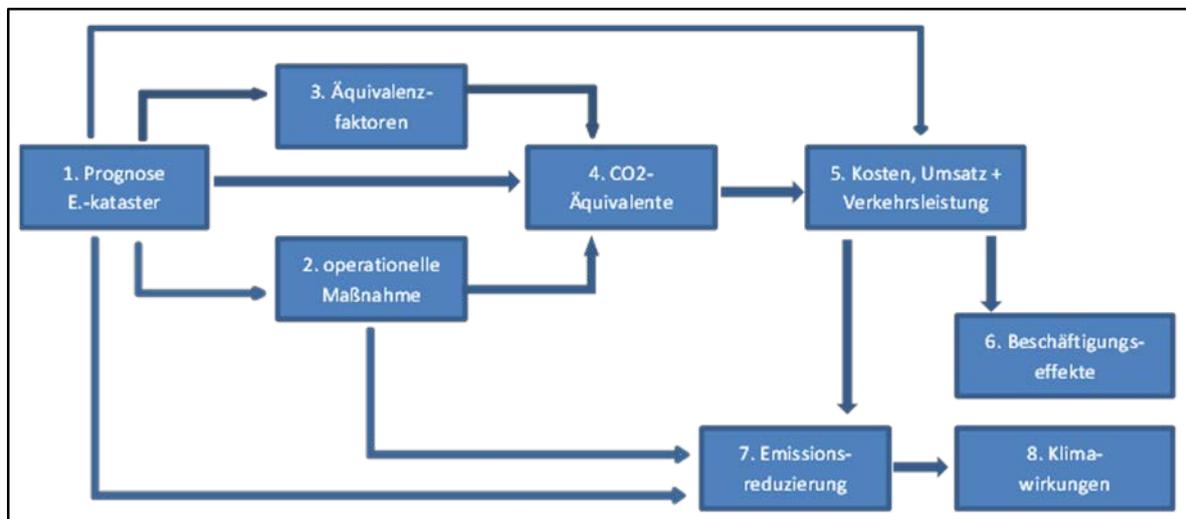
Die im Rahmen von AviClim durchgeführten Modellierungen sollen den Einfluss verschiedener klimapolitischer Maßnahmen auf die Klimawirkung des Luftverkehrs und die damit verbundenen ökonomischen Effekte abschätzen. Zu diesem Zweck werden verschiedene Modelle zu einer Modellkette kombiniert. Abbildung 5-1 gibt einen Überblick über die verschiedenen Modellierungsschritte. Im Folgenden werden diese Schritte kurz beschrieben und darauf verwiesen, an welcher Stelle dieses Berichts eine detaillierte Beschreibung zu finden ist.

1. Basis für die Modellierung ist die Prognose der weltweiten Luftverkehrsentwicklung und seiner klimarelevanten Emissionen in der Business-as-usual-Entwicklung. Für die Berechnungen im Rahmen von AviClim wird vor allen Dingen ein Emissionskataster benötigt, das die räumliche Verteilung der Emissionen auf dem Globus in verschiedenen Höhenlagen angibt. Siehe hierzu Kapitel 3 dieses Berichts.
2. Für die kombinierte klimapolitische Maßnahme „NO_x-Entgelte“ wird im zweiten Schritt das Emissionskataster entsprechend der angenommenen operationellen Maßnahmen modifiziert. Für die Klimasteuer und den Emissionshandel werden dagegen in der weiteren Modellierung direkt die Emissionskataster aus dem 1. Schritt verwendet. Siehe hierzu Kapitel 5.2 dieses Berichts.
3. Parallel dazu werden auf Grundlage des Emissionskatasters höhenabhängige Äquivalenzfaktoren berechnet (siehe Kapitel 2.4 dieses Berichts).
4. Mit Hilfe der Äquivalenzfaktoren werden auf Basis der Emissionskataster die CO₂-Äquivalente berechnet. Für die Maßnahme „NO_x-Entgelte“ wird dazu das im 2. Schritt modifizierte Kataster verwendet. Für die Klimasteuer und den Emissionshandel werden die unveränderten Kataster aus Schritt 1. verwendet. Siehe Kapitel 5.2 dieses Berichts.
5. Auf Grundlage der CO₂-Äquivalente (Schritt 4.) und der Gesamtverkehrsleistung in den jeweiligen geopolitischen Szenarien werden die Kosten der drei untersuchten klimapolitischen Maßnahmen, die Nachfrage- und Angebotseffekte sowie die sich daraus ergebende Veränderung der Verkehrsleistung berechnet. Siehe Kapitel 5.3, 5.4 und 6.1 dieses Berichts.

6. Basierend auf den Nachfrageeffekten werden die Beschäftigungseffekte der klimapolitischen Maßnahmen mit Hilfe von Input-Output-Modellen modelliert. Siehe Kapitel 7 dieses Berichts.
7. Parallel zu Schritt 6 wird die Veränderung der Verkehrsleistung auf das Emissionskataster übertragen. Siehe Kapitel 6.2 dieses Berichts.
8. Auf Basis der veränderten Emissionskataster wird die Klimawirkung der verschiedenen klimapolitischen Maßnahmen modelliert. Siehe Kapitel 6.2 dieses Berichts.

Die Modellierungen werden jeweils für die Stützjahre 2010, 2015, 2020, 2025 und 2030 durchgeführt.

Abbildung 5-1: Vereinfachte Darstellung der AviClim-Modellkette



Quelle: Eigene Darstellung. Siehe auch Erläuterung im Text.

5.2 Klimarelevante Emissionen in den geopolitischen Szenarien

5.2.1 Methodik

Die Berechnung der Kosten der Klimasteuer und des Emissionshandels basiert auf CO₂-Äquivalenten. Zur Berechnung der CO₂-Äquivalente werden die aufs Jahr hochgerechneten Ergebnisse des Emissionskatasters (siehe Kapitel 3 dieses Berichts) mit den entsprechenden Äquivalenzfaktoren (z.B. für atr 50, siehe Kapitel 2.4) multipliziert. Die Mengen an CO₂ und H₂O lassen sich entsprechend der Emissionsindizes aus den Kerosinwerten ableiten ($El_{CO_2}=3.15$, $El_{H_2O}=1.25$).

Die Berechnung wird für jedes Szenario \mathcal{S} durchgeführt. Das Emissionskataster ermöglicht die Zuordnung der Emissionen einer Zelle (c) zu einem Flug. Wenn nun der Flug unter das jeweilige Szenario fällt, werden auch die dem Flug zugeordneten Zellemissionen dem Szenario zugeordnet ($c \in \mathcal{S}$). Für die Gesamtemissionen ergibt sich damit:

$$CO_2Eq_{\mathcal{S},ges} = \sum_{c \in \mathcal{S}} CO_{2(c)} + NO_{x(c)} * atr_{50(alt)}^{(NO_x)} + H_2O_{(c)} * atr_{50(alt)}^{(H_2O)} + dist_{(c)} * atr_{50(alt)}^{(Cont)}$$

Dabei bezieht sich der Höhenwert (alt) jeweils auf die Höhe der jeweiligen Zelle (c). CO_2 , NO_x und H_2O werden in Kilogramm, die Distanz ($dist$) in Kilometern verwendet. Für die Gesamtemissionen CO_2Eq_{ges} ergeben sich entsprechend CO_2 -Äquivalente in Kilogramm.

Zur Berechnung der unter das kombinierte Instrument der NO_x -Entgelte fallenden CO_2 -Äquivalente wird zum einen für den CO_2 -Emissionshandel die Gesamtsumme der CO_2 -Emissionen differenziert nach geopolitischen Szenarien benötigt. Zum anderen werden die CO_2 -Äquivalente der NO_x -Emissionen benötigt. Wie in Kapitel 4 dargelegt, werden die CO_2 -Äquivalente aus den NO_x -Emissionen, die unter einer Flughöhe von 3.000 Metern entstehen, doppelt gewichtet (soweit sie positiv sind). In geringen Höhen kann die Klimawirkung für NO_x -Emissionen (atr_{50}) negativ sein. Um sicherzustellen, dass mit positiven NO_x -Emissionswerten gerechnet wird, wurde in der nachfolgenden Formel der Ausdruck in Klammern hinzugefügt:

$$CO_2Eq_{\mathcal{S},NO_x} = \sum_{c \in \mathcal{S}} NO_{x(cell)} * atr_{50(alt)}^{(NO_x)} + \sum_{\substack{c \in \mathcal{S}: \\ alt < 3000}} \max\left(0, NO_{x(cell)} * atr_{50(alt)}^{(NO_x)}\right)$$

Die operationellen Maßnahmen werden im Hinblick auf die Modellierungsreihenfolge vor der Berechnung der CO_2 -Äquivalente modelliert, aber aus Gründen der besseren Verständlichkeit an dieser Stelle näher beschrieben. Diese Maßnahmen wurden auf Basis der Ergebnisse von Fichter et al. (2009) und Fichter (2009) konzipiert, die den Einfluss einer Höhenänderung des Luftverkehrs auf die Klimawirkung untersucht haben. Dabei wurde gezeigt, dass eine Reduzierung der Flughöhe im Mittel zu einer Reduzierung der Klimawirkung von Kondensstreifen führt. Allerdings führt die Reduzierung der Flughöhe gleichzeitig zu einer Erhöhung des Treibstoffverbrauchs und der NO_x -Emissionen (siehe Tabelle 5-1). Die durch diese Vermeidung von Kondensstreifen verursachte verminderte Klimawirkung ist dabei größer als die Erhöhung der Klimawirkung, die auf die durch die Maßnahme verursachten Mehremissionen an CO_2 , NO_x und H_2O zurückzuführen ist. Für die modellgestützte Umsetzung der operationellen Maßnahmen wird vereinfachend nur die Hauptflugregion von 30° bis 60° nördliche geographische Breite betrachtet. In diesen Breitengraden entstehen die meisten Kondensstreifen in einer Höhe zwischen 9

und 12 km. Für die operationellen Maßnahmen wird nun angenommen, dass 50 % der Flüge im besagten Luftraum 2.000 Fuß tiefer fliegen.

Tabelle: 5-1: Emissionen bei reduzierter Flughöhe

<i>Flughöhe</i>	<i>Kerosinverbrauch [Tg]</i>	<i>NO_x-Emissionen [Tg]</i>
Normal	154	0.60
-2000 Fuß	158	0.62
-4000 Fuß	162	0.63
-6000 Fuß	163	0.63

Quelle: Fichter (2009).

Zur Neuberechnung werden alle betroffenen Katasterwerte (Kerosin, NO_x und zurückgelegte Distanz) um 50% reduziert und die abgezogenen Werte entsprechend um 2.000 Fuß tiefer neu eingefügt. Dabei werden die Kerosin- und NO_x-Mengen gemäß obiger Tabelle erhöht. Im Gegensatz zur zufälligen Auswahl von Flügen ist dieses Vorgehen unabhängig vom Zufall und im Mittel führt die angewandte Vorgehensweise zu den gleichen Ergebnissen (Gesetz der Großen Zahlen). Zu berücksichtigen ist hierbei jedoch, dass es sich um grobe Abschätzungen handelt, da der heutige diesbezügliche naturwissenschaftliche Kenntnisstand noch mit Unsicherheiten behaftet ist.

5.2.2 Ergebnisse

Die Tabellen 5-2 und 5-3 und Abbildung 5-2 zeigen eine Auswahl der mit Hilfe oben beschriebener Methoden und Modelle für die jeweiligen geopolitischen Szenarien berechneten Mengen an CO₂-Äquivalenten. Die kompletten Ergebnistabellen sind im Anhang zu finden.

Tabelle 5-2: Übersicht über die unter die jeweiligen geopolitischen Szenarien fallenden Mengen an CO₂-Äquivalenten, Metrik atr 50, in Mio. Tonnen

Year	Szenario Greater EU					Szenario Great Aviation Countries					Szenario World				
	CO ₂	Cont	H ₂ O	NO _x	Sum	CO ₂	Cont	H ₂ O	NO _x	Sum	CO ₂	Cont	H ₂ O	NO _x	Total
2010	202	259	29	237	728	535	749	71	569	1924	589	818	76	610	2093
2015	251	321	39	314	924	684	957	96	768	2505	757	1053	104	827	2740
2020	298	388	48	386	1120	829	1172	121	959	3082	921	1296	130	1034	3382
2025	338	446	56	434	1274	953	1360	142	1095	3549	1060	1509	154	1181	3905
2030	385	517	65	478	1446	1103	1596	168	1225	4092	1230	1778	182	1324	4514

Quelle: Eigene Berechnungen.

Tabelle 5-3: Übersicht über die unter die jeweiligen geopolitischen Szenarien fallenden Mengen an CO₂-Äquivalenten unter Berücksichtigung der operationellen Maßnahmen, Metrik atr 50, in Mio. Tonnen

Year	Szenario Greater EU					Szenario Great Aviation Countries					Szenario World				
	CO ₂	Cont	H ₂ O	NO _x	Sum	CO ₂	Cont	H ₂ O	NO _x	Sum	CO ₂	Cont	H ₂ O	NO _x	Total
2010	211	261	24	222	718	539	707	56	523	1825	595	774	61	564	1994
2015	263	324	32	294	914	690	905	77	705	2377	764	998	83	764	2609
2020	312	390	40	360	1102	837	1111	97	881	2925	929	1230	105	954	3219
2025	355	448	46	407	1256	962	1289	114	1005	3369	1070	1432	124	1090	3716
2030	404	519	54	448	1426	1113	1511	135	1124	3882	1242	1687	147	1221	4297

Quelle: Eigene Berechnungen.

Die Ergebnisse zeigen, dass Kondensstreifen-Zirren und NO_x-Emissionen bei Anwendung der Metrik atr 50 in etwa die gleiche Klimawirkung wie die CO₂-Emissionen haben, wobei die Wirkung von Kondensstreifen-Zirren etwas höher liegt als die von CO₂ und NO_x. Die Klimawirkung durch H₂O ist dagegen mit einem Anteil von ca. 3-5% vergleichsweise eher gering.

Über 90% der Klimawirkung entsteht dabei durch Flüge mit Start- und oder Zielflughafen in den „Great Aviation Countries“. Dagegen entsteht nur 35% der Klimawirkung durch Flüge mit Start- und/oder Zielflughafen in den „Greater EU“-Staaten. Entsprechend ist damit zu rechnen, dass Maßnahmen, die sich auf dieses Gebiet beschränken, nur begrenzte Wirksamkeit entfalten (können). Bedingt durch eine geringere durchschnittliche Flughöhe im Szenario „Greater EU“ ist der Anteil von Kondensstreifen-Zirren und NO_x in diesem geopolitischen Szenario etwas geringer als in den beiden anderen Szenarien.

In Bezug auf die operationellen Maßnahmen spiegeln die Ergebnisse wider, dass durch eine Optimierung der Flugrouten eine Einsparung der Emissionen erreicht werden kann. Dies zeigt auch

Abbildung 5-2. Die reduzierten Flughöhen führen zu einer verminderten Klimawirkung von Kondensstreifen und NO_x. Obwohl insgesamt größere NO_x-Mengen emittiert werden, ist die Klimawirkung bedingt durch eine geringere Emissionshöhe jedoch niedriger. Auch wenn die Gesamteinsparungen bei nur knapp 5% liegen, können isolierte operationelle Maßnahmen in Kombination mit anderen klimapolitischen Maßnahmen, wie z. B. der Klimasteuer oder dem Emissionshandel, bereits ein Anreiz für veränderte Flugrouten sein. Einsparungen bei der Klimasteuer oder beim Emissionshandel stehen jedoch erhöhte Ausgaben beim Treibstoffverbrauch gegenüber. Ob sich für die Fluggesellschaften eine Veränderung der Flugrouten lohnt, ist daher auch stark abhängig von der Entwicklung der Treibstoffkosten. Werden die aktuellen Kerosinpreise (IATA Platts, 2014) zugrunde gelegt, übersteigen die Mehrkosten für Kerosin potentielle Einsparungen bei der Klimasteuer oder beim Emissionshandel durch isolierte operationelle Maßnahmen bei weitem. Aufgrund dessen sind operationelle Maßnahmen bei aktuellen Kerosinpreisen nur in Kombination mit anderen klimapolitischen Instrumenten ökonomisch sinnvoll.

Tabelle 5-4: Übersicht über die unter die jeweiligen geopolitischen Szenarien fallenden Mengen an CO₂-Äquivalenten, Metrik atr 20, in Mio. Tonnen

Year	Szenario Greater EU					Szenario Great Aviation Countries					Szenario World				
	CO ₂	Cont	H ₂ O	NO _x	Sum	CO ₂	Cont	H ₂ O	NO _x	Sum	CO ₂	Cont	H ₂ O	NO _x	Total
2010	202	569	64	657	1493	535	1646	149	1609	3939	589	1798	167	1736	4290
2015	251	706	85	858	1900	684	2103	211	2149	5147	757	2314	228	2329	5627
2020	298	853	105	1049	2304	829	2576	265	2670	6340	921	2847	287	2900	6955
2025	338	980	123	1176	2617	953	2988	312	3035	7288	1060	3316	338	3300	8015
2030	385	1136	144	1292	2957	1103	3507	368	3394	8372	1230	3906	400	3695	9231

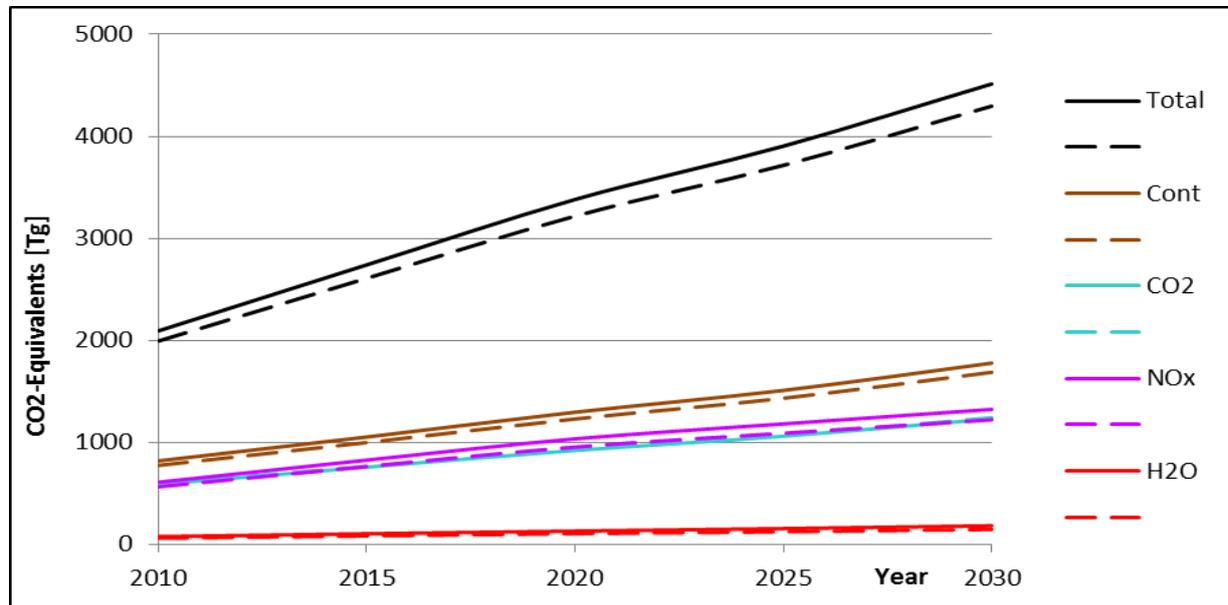
Quelle: Eigene Berechnungen.

Tabelle 5-5: Übersicht über die unter die jeweiligen geopolitischen Szenarien fallenden Mengen an CO₂-Äquivalenten unter Berücksichtigung der operationellen Maßnahmen, Metrik atr 20, in Mio. Tonnen

Year	Szenario Greater EU					Szenario Great Aviation Countries					Szenario World				
	CO ₂	Cont	H ₂ O	NO _x	Sum	CO ₂	Cont	H ₂ O	NO _x	Sum	CO ₂	Cont	H ₂ O	NO _x	Total
2010	211	573	52	633	1470	539	1553	119	1518	3729	595	1702	133	1647	4077
2015	263	712	70	829	1874	690	1988	169	2024	4871	764	2193	183	2204	5345
2020	312	857	87	1008	2263	837	2440	212	2515	6005	929	2702	231	2741	6603
2025	355	985	102	1133	2574	962	2831	250	2857	6900	1070	3147	273	3118	7608
2030	404	1140	119	1245	2909	1113	3319	296	3192	7920	1242	3707	322	3490	8761

Quelle: Eigene Berechnungen.

Abbildung 5-2: Vergleich der weltweiten Klimawirkung (atr 50) durch verschiedene Emissionen, jeweils ohne (durchgezogen) und mit isolierten operationellen Maßnahmen (gestrichelt)



Quelle: Eigene Berechnungen.

5.3 Kosten der klimapolitischen Maßnahmen

5.3.1 Annahmen und Ergebnisse für den Luftverkehrssektor

Die wichtigsten Elemente für eine Modellierung der wirtschaftlichen Auswirkungen der klimaschützenden Instrumente im Luftverkehr sind zum einen der Steuersatz bzw. die Höhe des Entgelts respektive die Preise, die pro verursachter Einheit CO₂-Äquivalent erhoben werden. Die Einführung von klimapolitischen Instrumenten wird in aller Regel zu einer Erhöhung der Produktionskosten der betroffenen Fluggesellschaften führen. Grundsätzlich gehen wir davon aus, dass die Fluggesellschaften versuchen werden, die gesamte Kostenbelastung, die aus den klimapolitischen Instrumenten resultiert, an die Nachfrager weiterzugeben. Implizit wird damit angenommen, dass sich die Fluggesellschaften als Gewinnmaximierer verhalten und dass eigene Vermeidungsmaßnahmen von klimarelevanten Emissionen keine Option auf breiter Basis darstellen. Eine Ausnahme besteht in den operationellen Maßnahmen, die ergänzend zu den NO_x-Entgelten angenommen wurden.

Zum anderen ist von großer Bedeutung, ob und in welcher Weise die Nachfrager nach Luftverkehrsdienstleistungen (Geschäfts- und Privatreisende, Versender von Fracht) auf diese Preisveränderung reagieren werden. Die Modellierung dieser Einflussgrößen wird im Folgenden erläu-

tert.

Unsere Annahmen zum Steuersatz bzw. zur Höhe des Entgelts respektive den Preisen, die pro verursachter Einheit CO₂-Äquivalent erhoben werden, und zu deren zukünftiger Entwicklung im Zeitraum bis 2030 beruhen auf eigenen Schätzungen. Diese wurden auf der Basis von aktuellen Forschungsergebnissen vorgenommen, die in der einschlägigen Literatur veröffentlicht wurden (siehe hierzu z. B. Anger/Köhler (2010), Malina et al. (2012), Scheelhaase et al. (2012) und Derigs/Illing (2013)), und auf der Grundlage folgender Überlegungen:

- Die optimale Höhe der Steuer, des Entgelts bzw. des Preises für Emissionsrechte wird unmittelbar von den Vermeidungskosten für eine zusätzliche Einheit CO₂-Äquivalent bestimmt. Denn die Emittenten können entweder ihre klimarelevanten Emissionen verringern oder die Kosten für das klimapolitische Instrument entrichten. Dies wurde durch die umweltökonomische Theorie bereits vor vielen Jahren gezeigt (siehe hierzu z. B. Dales (1968) sowie Siebert (1976)). Die entsprechenden Vermeidungskosten wurden in Anlehnung an die Angaben in der Literatur geschätzt. Weiterhin wurde die aktuelle Preisentwicklung für EU-Emissionsrechte in die Schätzung der Vermeidungskosten miteinbezogen. Hierbei ist zu berücksichtigen, dass sich die Angaben in der Literatur zumeist auf Kosten (und damit Preise) für CO₂-Emissionsrechte beziehen, da Kostenschätzungen für eine Klimasteuer sowie für NO_x-Entgelte kaum verfügbar sind. Außerdem muss berücksichtigt werden, dass zumeist unklar ist, nach welcher Methode die jeweiligen Kosten in der Literatur geschätzt wurden, da Angaben hierzu fehlen.
- Im Laufe der Zeit werden sich die Kosten für die Vermeidung zusätzlicher klimarelevanten Emissionen erhöhen. Dies liegt daran, dass zunächst die preisgünstigsten Vermeidungsmöglichkeiten ausgeschöpft werden und danach erst die kostenintensiveren Optionen zum Einsatz kommen werden. Im Rahmen eines Zertifikatmodells kommen steigende Kosten auch durch die relative Verknappung der Emissionsrechtemenge zustande. Vor diesem Hintergrund nehmen wir an, dass die Höhe der Klimasteuer, des Entgelts auf NO_x-Emissionen sowie der Emissionsrechtepreis pro Einheit CO₂-Äquivalent bis zum Jahr 2030 steigen werden.
- Wegen des eher hohen Grades an Unsicherheit hinsichtlich zukünftiger Entwicklungen gehen wir alternativ von drei möglichen Preisentwicklungen aus, nämlich einer „High Price Entwicklung“, einer „Low Price Entwicklung“ und einer „Mixed Price Entwicklung“.

- Um die Modellierungsergebnisse besser vergleichbar zu machen, gehen wir in den Preisszenarien „Low Price Scenario“ und „High Price Scenario“ für alle drei hier untersuchten klimapolitischen Instrumente von jeweils identischen finanziellen Belastungen pro Einheit CO₂-Äquivalent aus. Damit wird eine Einheit CO₂-Äquivalent bei der Klimasteuer, den NO_x-Entgelten und dem Emissionshandel mit einem identischen Preis versehen. Auch die Änderungsraten der Preise im Zeitverlauf sind für alle drei klimapolitischen Instrumente gleich.

Im dritten Preisszenario, dem sog. „Mixed Price Scenario“ wird hingegen angenommen, dass die Preise für CO₂-Äquivalente im Rahmen der Emissionshandelsmodelle (Emissionshandel für alle klimarelevanten Gase sowie CO₂-Emissionshandel) jeweils niedriger sind als der Preis pro Einheit CO₂-Äquivalent, der bei der Klimasteuer und beim NO_x-Entgelt auf die NO_x-Emissionen erhoben wird. Diese Preisdifferenzierung beruht auf der Überlegung, dass die Kosten der Vermeidung zusätzlicher CO₂-Emissionen bei vielen anderen Sektoren, so z. B. der stationären Energieerzeugung oder energieintensiven Industrien, deutlich niedriger sind als beim Luftverkehr. Denn vielen Sektoren stehen hierfür – anders als im Luftverkehr – eine Reihe relativ kostengünstiger technologischer und operativer Maßnahmen zur Verfügung. Im Rahmen eines sog. „offenen“ Emissionshandels kann und wird der Luftverkehr Emissionsrechte zu einem möglichst günstigen Preis und damit von Emittenten mit relativ niedrigen Vermeidungskosten erwerben. Folglich spricht vieles dafür, dass die Preise für CO₂-Emissionsrechte auf einem Markt mit vielen verschiedenen Emittenten(gruppen) deutlich niedriger sein werden als bei einem Handel, der ausschließlich innerhalb des Luftverkehrssektors stattfindet. Diesem Sachverhalt wird im Rahmen des „Mixed Price Scenario“ Rechnung getragen. In diesem Preisszenario entsprechen die Preise für die Klimasteuer denen im High Price Scenario und die Preise für den Emissionshandel für alle klimarelevanten Gase denen im Low Price Scenario. Die Preise für die NO_x-Charge setzen sich zusammen aus den höheren Preisen auf die NO_x-Emissionen (High Price Scenario) und den niedrigeren Preisen auf die CO₂-Emissionen, die dem Low Price Scenario entnommen wurden, wobei letztgenannte Preise nur für den CO₂-Emissionshandel gelten.

Vor dem Hintergrund dieser Überlegungen nehmen wir für die Jahre 2010 bis 2030 die in der nachfolgenden Tabelle dargestellten Preisentwicklungen pro Tonne CO₂-Äquivalent an.

Tabelle 5-6: Annahmen zur Preisentwicklung pro Tonne CO₂-Äquivalent, in USD

Price Scenario	2010			2015			2020			2025			2030		
	CT	ET	NO _x -Charge												
Low Price Scenario	10	10	10	15	15	15	20	20	20	25	25	25	30	30	30
High Price Scenario	10	10	10	25	25	25	40	40	40	60	60	60	80	80	80
Mixed Price Scenario	10	10	10/10	25	15	25/15	40	20	40/20	60	25	60/25	80	30	80/30

Quelle: Eigene Schätzung. Angaben in Preisen von 2012. CT = Klimasteuer; ET = Emissionshandel für alle klimarelevanten Gase; NO_x-Charge = NO_x-Entgelt kombiniert mit CO₂-Emissionshandel und operationellen Maßnahmen. Preisangaben für NO_x-Charge: Preis für NO_x-Entgelt/Preis für CO₂-Emissionshandel.

Mithilfe der Preise pro Tonne CO₂-Äquivalent und der Gesamtmengen an CO₂-Äquivalenten in den jeweiligen Szenarien lassen sich die Gesamtkosten der drei betrachteten klimapolitischen Instrumente errechnen. Die nachfolgenden drei Tabellen zeigen diese Gesamtkosten differenziert nach Szenarien, Metriken und angenommenen Preisentwicklungspfaden. Die Gesamtkosten wurden jeweils für alle Flüge der Fluggesellschaften errechnet, die unter das jeweilige klimapolitische Instrument fallen.

Da bei der hier gewählten instrumentellen Ausgestaltung jeweils die Fluggesellschaften primärer Adressat des jeweiligen klimapolitischen Instruments sind, konzentrieren sich die folgenden Darstellungen auf die Kosten der Fluggesellschaften. Weitere Stakeholder im Luftverkehr wie z. B. die Flughäfen oder Flugsicherungsinstitutionen (z. B. EUROCONTROL) sind von den klimapolitischen Instrumenten indirekt betroffen. Diese Effekte werden ausschnittsweise im Kapitel „Beschäftigungseffekte der klimapolitischen Maßnahmen“ mit Hilfe der Vorleistungseffekte dargestellt.

Wie aus den Tabellen ersichtlich, steigen die Gesamtkosten für die jeweiligen klimapolitischen Instrumente in jedem untersuchten geopolitischen Szenario im Betrachtungszeitraum stetig an. Dies kann folgendermaßen begründet werden: Wie in Kapitel 3.2 dargelegt, gehen wir von einem Wachstum des Luftverkehrs im Zeitraum 2010 – 2030 aus. Dies führt wie dargestellt zu steigenden klimarelevanten Emissionen des Luftverkehrs. Entsprechend ist mit höher werdenden Kosten für die jeweils angenommenen klimapolitischen Instrumente zu rechnen.

Weiterhin wird deutlich, dass die Gesamtkosten aller untersuchten klimapolitischen Instrumente im geopolitischen Szenarienvergleich im Szenario „Greater EU“ am geringsten sind. Hier wurden Gesamtkosten zwischen 1 Mrd. USD (Emissions Trading, atr 50, Low Price Scenario sowie Mixed Price Scenario im Jahr 2010) und 212 Mrd. USD (Climate Tax, atr 20, High Price Scenario im Jahr 2030) errechnet. Dies erklärt sich dadurch, dass dieses geopolitische Szenario die kleinste Menge an durch die jeweiligen Instrumente regulierten klimarelevanten Emissionen und damit die geringste Zahl (und Gesamtlänge) an regulierten Flügen aufweist. Folglich erhöhen sich die Gesamtkosten für die klimapolitischen Instrumente mit zunehmender Menge an regulierten klimarelevanten Emissionen auf bis zu 688 Mrd. USD (Klimasteuer) im Szenario „World“, atr 20, High Price Scenario im Jahr 2030.

Bemerkenswert sind weiterhin die relativ geringen Unterschiede der Ergebnisse für die geopolitischen Szenarien „Great Aviation Countries“ und „Annex-I Countries“. So wurden beispielsweise für das Low Price Scenario für das Instrument Climate Tax im Jahr 2030 im Szenario „Great Aviation Countries“ Gesamtkosten von 233 Mrd. USD und im Szenario „Annex-I Countries“ 224 Mrd. USD errechnet sowie für die NO_x-Charge 116 Mrd. USD („Great Aviation Countries“) bzw. 111 Mrd. USD („Annex-I Countries“). Hintergrund hierfür ist, dass die Annex-I-Staaten plus die BRIC-Staaten weitgehend deckungsgleich mit den wichtigsten Playern im Luftverkehr sind. Wie erwartet, wurden für das Szenario „World“ die höchsten Gesamtkosten für die jeweiligen klimapolitischen Instrumente errechnet. Diese liegen für das High Price Scenario und die Metrik atr 20 zwischen 339 Mrd. USD (NO_x-Charge) und 688 Mrd. USD (Climate Tax) im Jahr 2030.

Verglichen mit den aktuellen Preisen für Kerosin im Jahr 2013 von 2,83 – 3,01 USD pro Gallone (circa 0,74 – 0,79 USD/Liter bzw. etwa 0,9 – 1,0 USD/kg) (IATA Platts, 2014) würde die Einführung eines klimapolitischen Instruments mit einem Preis von 10 USD pro Tonne CO₂-Äquivalent zu einer Kostenerhöhung um etwa 0,03 USD pro kg Kerosin führen, ein Preis von 30 USD pro Tonne CO₂-Äquivalent entsprechend zu einer Kostenerhöhung um etwa 0,10 USD pro kg Kerosin (jeweils bezogen auf den CO₂-Gehalt von Kerosin). Der höchstmöglich im Rahmen von AviClim angenommene Preis von 80 USD/T CO₂ würde zu einer Kostenerhöhung um etwa 0,25 USD pro kg Kerosin führen.

Tabelle 5-7: Gesamtkosten für klimapolitische Instrumente in Mrd. USD; Low Price Scenario

	Scenario „Greater EU“, atr 20			Scenario „Greater EU“, atr 50			Scenario „Great Aviation Countries“, atr 20			Scenario „Great Aviation Countries“, atr 50		
Year	Climate Tax	Emissions Trading	NO _x -Charge	Climate Tax	Emissions Trading	NO _x -Charge	Climate Tax	Emissions Trading	NO _x -Charge	Climate Tax	Emissions Trading	NO _x -Charge
2010	14	2	7	7	1	3	39	6	16	19	3	6
2015	27	8	14	13	4	6	74	25	34	36	12	14
2020	42	17	23	21	9	10	120	54	58	59	26	25
2025	59	28	33	29	14	15	170	87	84	83	43	38
2030	79	42	44	39	21	20	233	134	116	115	67	53
	Scenario „Annex-I Countries“, atr 20			Scenario „Annex-I Countries“, atr 50			Scenario „World“, atr 20			Scenario „World“, atr 50		
2010	38	6	16	18	3	6	42	6	17	21	3	7
2015	72	24	33	35	12	13	81	27	37	40	13	15
2020	116	51	56	57	25	24	132	60	64	64	29	28
2025	164	83	81	80	41	36	187	98	92	92	48	41
2030	224	128	111	111	64	51	258	150	127	127	75	59

Quelle: Eigene Berechnungen. In Preisen von 2012.

Tabelle 5-8: Gesamtkosten für klimapolitische Instrumente in Mrd. USD; High Price Scenario

	Scenario „Greater EU“, atr 20			Scenario „Greater EU“, atr 50			Scenario „Great Aviation Countries“, atr 20			Scenario „Great Aviation Countries“, atr 50		
Year	Climate Tax	Emissions Trading	NO _x -Charge	Climate Tax	Emissions Trading	NO _x -Charge	Climate Tax	Emissions Trading	NO _x -Charge	Climate Tax	Emissions Trading	NO _x -Charge
2010	14	2	7	7	1	3	39	6	16	19	3	6
2015	45	14	23	22	7	9	124	41	57	61	20	23
2020	84	35	46	41	17	20	239	108	116	117	53	50
2025	141	67	79	70	34	35	407	209	202	200	103	90
2030	212	113	118	105	57	54	621	357	309	306	177	142
	Scenario „Annex-I Countries“, atr 20			Scenario „Annex-I Countries“, atr 50			Scenario „World“, atr 20			Scenario „World“, atr 50		
2010	38	6	16	18	3	6	42	6	17	21	3	7
2015	120	40	54	59	19	22	135	46	62	66	22	26
2020	231	103	112	113	50	48	263	120	127	129	59	55
2025	393	200	194	193	99	87	449	234	222	221	116	99
2030	598	341	295	295	170	136	688	401	339	339	199	156

Quelle: Eigene Berechnungen. In Preisen von 2012.

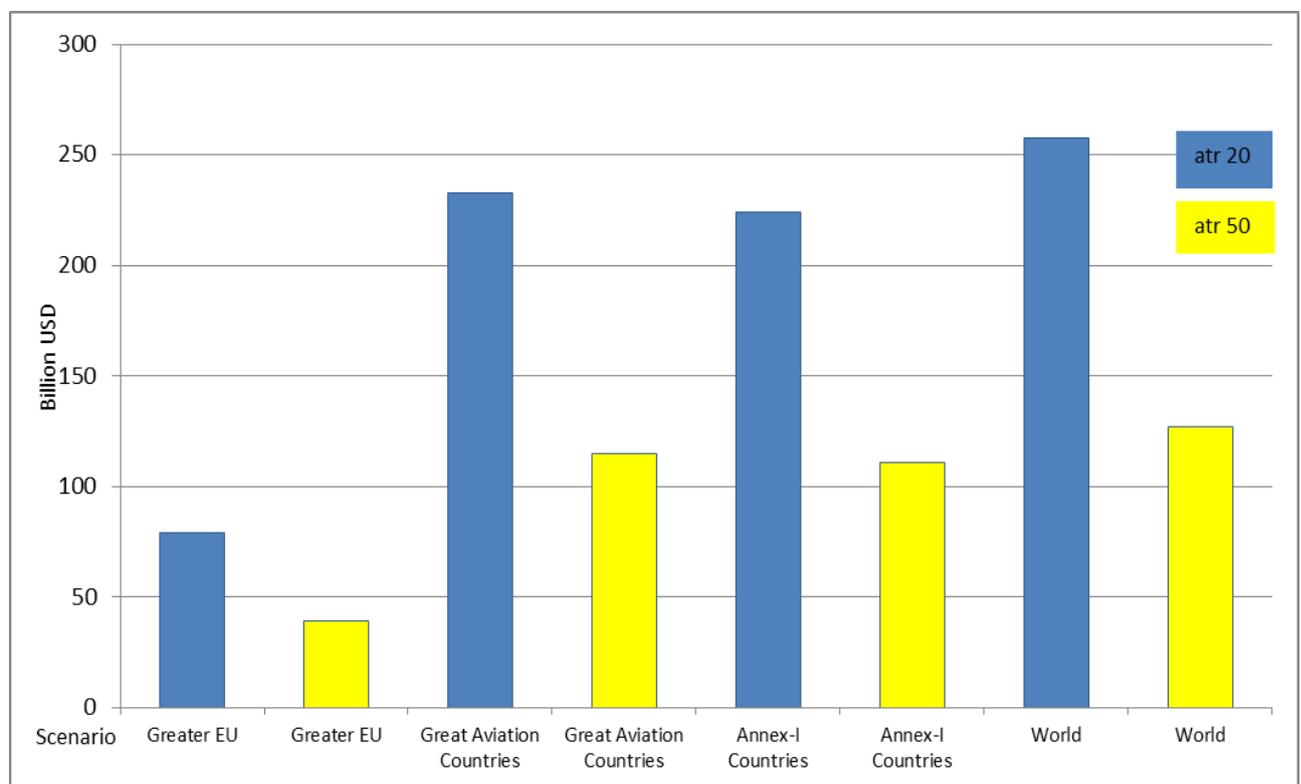
Tabelle 5-9: Gesamtkosten für klimapolitische Instrumente in Mrd. USD; Mixed Price Scenario

	Scenario „Greater EU“, atr 20			Scenario „Greater EU“, atr 50			Scenario „Great Aviation Countries“, atr 20			Scenario „Great Aviation Countries“, atr 50		
Year	Climate Tax	Emissions Trading	NO _x -Charge	Climate Tax	Emissions Trading	NO _x -Charge	Climate Tax	Emissions Trading	NO _x -Charge	Climate Tax	Emissions Trading	NO _x -Charge
2010	14	2	7	7	1	3	39	6	16	19	3	6
2015	45	8	22	22	4	9	124	25	54	61	12	21
2020	84	17	43	41	9	17	239	54	109	117	26	43
2025	141	28	72	70	14	29	407	87	185	200	43	73
2030	212	42	106	105	21	43	621	134	276	306	67	109
	Scenario „Annex-I Countries“, atr 20			Scenario „Annex-I Countries“, atr 50			Scenario „World“, atr 20			Scenario „World“, atr 50		
2010	38	6	16	18	3	6	42	6	17	21	3	7
2015	120	24	52	59	12	20	135	27	59	66	13	23
2020	231	51	104	113	25	41	263	60	119	129	29	47
2025	393	83	177	193	41	70	449	98	202	221	48	79
2030	598	128	264	295	64	104	688	150	303	339	75	120

Quelle: Eigene Berechnungen. In Preisen von 2012.

Die jeweils angenommene Metrik hat ebenfalls einen großen Einfluss auf die errechneten Gesamtkosten: Wie die Tabellen 5-7 bis 5-9 zeigen, wurden für die Metrik atr 20 jeweils Gesamtkosten errechnet, die etwa doppelt so groß sind wie die für die Metrik atr 50 berechneten Ergebnisse. Der Hintergrund hierfür ist, dass die Metrik atr 20 die kurzlebigeren Klimagase stärker berücksichtigt als die Metrik atr 50. Dies veranschaulicht die nachfolgende Abbildung, die die Gesamtkosten für das Instrument Climate Tax im Low Price Scenario differenziert nach geopolitischen Szenarien im Jahr 2030 zeigt. Auch hier zeigen sich wieder die relativ geringen Unterschiede zwischen den Szenarien „Great Aviation Countries“ und „Annex-I Countries“.

Abbildung 5-3: Vergleich der Effekte der Metriken auf die Gesamtkosten für das Instrument Climate Tax, Low Price Scenario, Angaben für 2030 in Mrd. USD

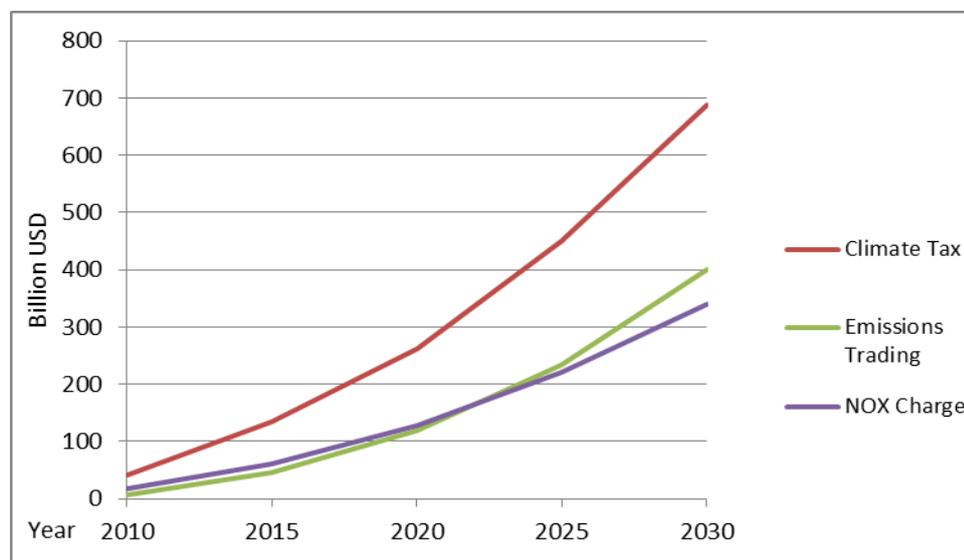


Quelle: Eigene Berechnungen. In Preisen von 2012.

Die einzelnen klimapolitischen Instrumente verursachen unterschiedliche Gesamtkosten bei den Fluggesellschaften der betrachteten Ländergruppen. Wie die Tabellen 5-7 bis 5-9 zeigen, fallen die Gesamtkosten für das Instrument Climate Tax stets am höchsten aus, während die Kosten für die Instrumente Emissionshandel (für alle klimarelevanten Gase) und NO_x-Charge z. T. deutlich niedriger liegen. Bemerkenswert ist, dass der Emissionshandel im High Price Scenario in einigen geopolitischen Szenarien im Zeitverlauf zunächst zu den im Instrumentenvergleich niedrigsten Gesamtkosten führt, im Laufe des Betrachtungszeitraums aber mittlere Gesamtkosten verur-

sacht. Dieser „Switch“ zwischen den jeweils niedrigsten Kosten für die Instrumente Emissionshandel für alle klimarelevanten Gase und NO_x-Charge kann durch die grundsätzlich unterschiedliche Wirkungsweise der beiden betrachteten Instrumente erklärt werden: Beim Emissionshandel für alle klimarelevanten Gase werden jedes Jahr Emissionsrechte in Höhe von 85% der klimarelevanten Emissionen des Jahres 2010 gratis ausgegeben. Entsprechend muss zu Beginn nur eine verhältnismäßig geringe Menge an Emissionsrechten zugekauft werden, was zu relativ niedrigen Kosten führt. Im Zeitverlauf steigen die klimarelevanten Emissionen des Luftverkehrs aufgrund des Luftverkehrswachstums und damit die zuzukaufende Menge an Emissionsrechten. Folglich steigen die Kosten für den Erwerb von Emissionsrechten für alle klimarelevanten Gase. Beim Instrument NO_x-Charge, das wie in Kapitel 4 erläutert, aus einer Kombination von NO_x-Entgelten mit einem CO₂-Emissionshandel und operationellen Maßnahmen besteht, überlagern sich die einzelnen Effekte: Während sich das NO_x-Entgelt linear kostenerhöhend auswirkt, führt auch der CO₂-Emissionshandel zu einer erst relativ niedrigen, im Zeitverlauf aber stetig steigenden Kostenbelastung. Diese Zusammenhänge veranschaulicht die nachfolgende Graphik, die die Kostenentwicklung für die drei klimapolitischen Instrumente im Szenario „World“ für die Metrik atr 20 im High Price Szenario zeigt.

Abbildung 5-4: Vergleich der Kostenentwicklung der klimapolitischen Instrumente, Szenario „World“, atr 20, High Price Szenario, Angaben in Mrd. USD

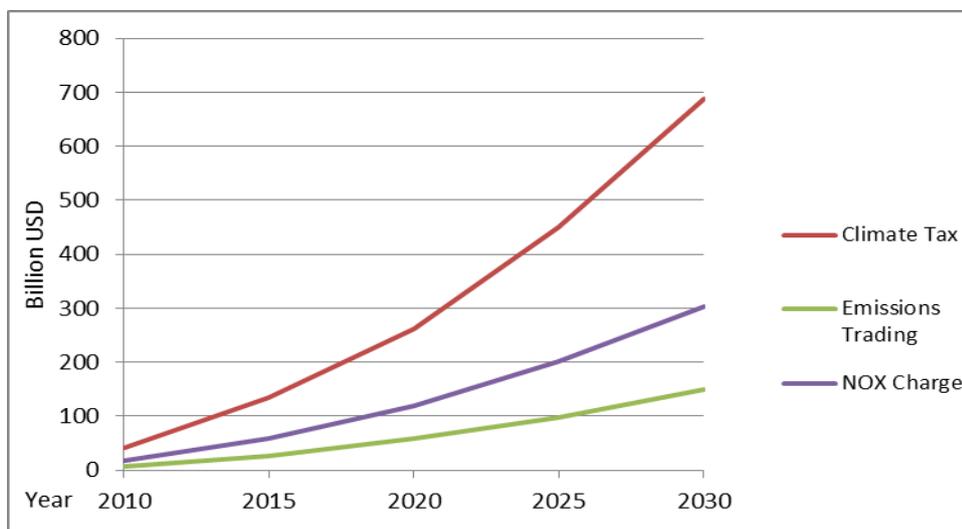


Quelle: Eigene Berechnungen. In Preisen von 2012.

Auch im Mixed Price Szenario verursacht die Climate Tax die größte absolute Kostenbelastung für die Fluggesellschaften, an zweiter Stelle folgt in diesem Preisszenario aber für jeden Zeitpunkt des Betrachtungszeitraums die NO_x-Charge, wie die nachfolgende Abbildung veranschaulicht.

licht. Der Emissionshandel für alle klimarelevanten Gase ist in diesem Preisszenario das unter Kostengesichtspunkten klar überlegene Instrument. Dies kann damit begründet werden, dass der Emissionshandel im Mixed Price Szenario annahmegemäß niedrigere Kosten pro Einheit CO₂-Äquivalent hat als die Klimasteuer und das Entgelt auf die NO_x-Emissionen. Hier zeigt sich der ökonomische Vorteil eines offenen Emissionshandelsmodells sehr deutlich gegenüber den Instrumenten Klimasteuer und NO_x-Charge, aber auch im Vergleich zu einem geschlossenen Emissionshandelsmodell.

Abbildung 5-5: Vergleich der Kostenentwicklung der klimapolitischen Instrumente, Szenario „World“, atr 20, Mixed Price Szenario, Angaben in Mrd. USD



Quelle: Eigene Berechnungen. In Preisen von 2012.

Welche Kosten entstehen durch die klimapolitischen Instrumente pro Passagier und Flug? Einen Überblick hierzu vermittelt die nachfolgende Tabelle, die exemplarisch für drei Flüge erstellt wurde:

- Amsterdam Schiphol (AMS) – Paris Charles de Gaulle (CDG) als Beispiel für einen Kurzstreckenflug (480 km);
- München (MUC) – Palma de Mallorca (PMI) als Beispiel für einen Mittelstreckenflug (1.402 km) sowie
- München (MUC) – Miami (MIA) als Beispiel für einen Langstreckenflug (8.058 km).

Die Beispielrechnungen wurden für die klimapolitischen Instrumente Climate Tax und Emissions Trading und für die Metrik atr 50 unter den Annahmen des High Price Szenarios und des Low Price Szenarios durchgeführt. Auf diese Weise können die Effekte auf die Ticketpreise in einer großen Bandbreite gezeigt werden. Hierbei ist grundsätzlich zu berücksichtigen, dass jeweils die

Kosten pro Flugsegment (one-way Flug) abgeschätzt wurden. Mithin ist bei einem Hin- und Rückflug von einer doppelt so hohen Kostenbelastung auszugehen.

Je nachdem, ob die Fluggesellschaften versuchen werden, die Kosten der klimapolitischen Instrumente vollständig an die Passagiere weiterzugeben, oder ob auch die bei vielen Flügen mittransportierte Beifracht (belly-hold cargo) finanziell belastet wird, resultieren unterschiedliche Kostenbelastungen pro Passagier und Flug. Dies wird in der nachfolgenden Tabelle ebenfalls präsentiert. Für den letztgenannten Fall, also der finanziellen Belastung von Passagieren und Fracht wurde von einer 50:50-Aufteilung der Kosten und von einem durchschnittlichen Frachtvolumen von 20.000 kg pro Flug ausgegangen.

Tabelle 5-10: Kostenbelastung durch ausgewählte klimapolitische Instrumente pro Passagier und Flugsegment für Beispielflüge

Costs in USD, per passenger one-way, without belly-hold cargo, atr 50										
Costs Climate Tax					Low Price Scenario			High Price Scenario		
Dep	Arr	Aircraft	Seats	Airline	2010	2020	2030	2010	2020	2030
AMS	CDG	B737	134	KL	1,1	2,1	3,2	1,1	4,3	8,6
MUC	PMI	A320	144	LH	5,3	10,5	15,8	5,3	21,1	42,1
MUC	MIA	A333	221	LH	32,6	65,2	97,8	32,6	130,4	260,7
Costs Emissions Trading all climate relevant species					Low Price Scenario			High Price Scenario		
Dep	Arr	Aircraft	Seats	Airline	2010	2020	2030	2010	2020	2030
AMS	CDG	B737	134	KL	0,2	0,9	1,7	0,2	1,8	4,6
MUC	PMI	A320	144	LH	0,8	4,5	8,4	0,8	9,1	22,3
MUC	MIA	A333	221	LH	4,9	28,0	51,8	4,9	56,1	138,2
Costs in USD, per passenger one-way, with belly-hold cargo, atr 50										
Costs Climate Tax					Low Price Scenario			High Price Scenario		
Dep	Arr	Aircraft	Seats	Airline	2010	2020	2030	2010	2020	2030
AMS	CDG	B737	134	KL	0,5	1,1	1,6	0,5	2,1	4,3
MUC	PMI	A320	144	LH	2,6	5,3	7,9	2,6	10,5	21,1
MUC	MIA	A333	221	LH	16,3	32,6	48,9	16,3	65,2	130,4
Costs Emissions Trading all climate relevant species					Low Price Scenario			High Price Scenario		
Dep	Arr	Aircraft	Seats	Airline	2010	2020	2030	2010	2020	2030
AMS	CDG	B737	134	KL	0,08	0,46	0,9	0,1	0,9	2,3
MUC	PMI	A320	144	LH	0,39	2,26	4,2	0,4	4,5	11,2
MUC	MIA	A333	221	LH	2,44	14,01	25,9	2,4	28,0	69,1

Assumption: costs passengers - cargo are shared 50:50.

Quelle: Eigene Berechnungen. In Preisen von 2012.

Wie die Tabelle zeigt, ist von einer großen Bandbreite der Kosten pro Passagier und Flug auszugehen. Maßgeblich dafür sind in erster Linie die Gesamtkosten pro klimapolitischem Instrument: So liegen die Ticketpreisänderungen durch die Klimasteuer durchweg auf einem erheblich höheren Niveau als die Preisänderungen, die durch den Emissionshandel verursacht werden. Aber auch die Länge des Fluges hat einen großen Einfluss auf die Veränderungen der Ticketpreise durch die klimapolitischen Instrumente. Während sich ein Kurzstreckenflug beispielsweise im Jahr 2020 im Low Price Scenario um circa 0,9 – 2,1 USD (ohne Berücksichtigung von Beifracht) bzw. circa 0,5 – 1 USD (unter Berücksichtigung von Beifracht) verteuert, steigen die Ticketpreise für einen Langstreckenflug um etwa 28 – 65 USD (ohne Berücksichtigung von Beifracht) bzw. etwa 14 – 32 USD (unter Berücksichtigung von Beifracht). Dies erklärt sich durch die sehr unterschiedlichen Mengen an klimarelevanten Emissionen, die auf den hier betrachteten Flügen verursacht werden. Der von uns untersuchte Flug Amsterdam – Paris verursacht unter den getroffenen Annahmen (Boeing 737, 134 Sitze, Auslastung 70 %) Gesamtemissionen in Höhe von 10,1 t CO₂-Äquivalent. Hingegen werden auf dem Flug München – Miami mit einem Airbus A 330-300 (221 Sitze, Auslastung knapp 84 %) etwa 602,2 t CO₂-Äquivalent emittiert.

Unter den Annahmen des High Price Scenarios ist mit deutlich höheren Ticketpreisänderungen zu rechnen. Wie aus der Tabelle ersichtlich, steigen die Zusatzbelastungen pro Flug und Passagier dann auf bis zu etwa 138 – 260 USD (ohne Berücksichtigung von Beifracht) bzw. circa 69 – 130 USD (unter Berücksichtigung von Beifracht) im Jahr 2030 für den Langstreckenflug München – Miami. Die vollständige Überwälzung solcher Zusatzbelastungen auf die Passagiere bzw. Versender von Fracht erscheint angesichts des hohen Wettbewerbsdrucks im Luftverkehrsmarkt schwer vorstellbar.

Es spricht vieles dafür, dass sich auch die Kosten von Beifracht durch die Einführung von klimapolitischen Instrumenten erhöhen werden. Unter der oben erwähnten Annahme von 20.000 kg Beifracht pro Flug und einer hälftigen Anlastung der Kosten durch die klimapolitischen Instrumente auf Passagiere und Fracht, werden sich die Frachtraten beispielweise im Jahr 2030 für den von uns untersuchten Mittelstreckenflug im Low Price Scenario um etwa 0,04 USD (Klimasteuer) bzw. circa 0,02 USD (Emissionshandel) pro kg Fracht erhöhen. Bei dem hier analysierten Langstreckenflug würden sich die Frachtraten im Low Price Scenario im selben Jahr um etwa 0,5 USD (Klimasteuer) bzw. circa 0,2 USD (Emissionshandel) pro kg Fracht erhöhen. Zum Vergleich: Im Jahr 2007 betragen die gesamten operating costs im Nur-Frachtbereich im Durchschnitt pro kg etwa 1,48 USD für eine

Boeing 747-400F sowie für eine Boeing 777F; etwa 1,52 USD für eine MD-11F sowie etwa 1,69 USD für einen Airbus 380F (Morell, 2011). Mithin würden sich die Kosten für Luftfracht durch die klimapolitischen Instrumente insbesondere auf der Langstrecke erheblich erhöhen.

5.3.2 Kostenbelastung ausgewählter Gruppen von Fluggesellschaften

5.3.2.1 Bestimmungsfaktoren für die Höhe der einzelwirtschaftlichen Kostenbelastungen

Die oben dargestellten klimapolitischen Maßnahmen werden sich in unterschiedlicher Weise auf die Kostensituation der einzelnen Fluggesellschaften auswirken. Hierfür können unabhängig von den dargelegten Unterschieden, die durch die jeweiligen klimapolitischen Instrumente und Szenarien hervorgerufen werden, drei grundlegende Bestimmungsfaktoren genannt werden:

1. Abhängig davon, ob alle oder nur eine Teilmenge der von der jeweiligen Fluggesellschaft angebotenen Flüge unter das klimapolitische Instrument fallen, werden für die Fluggesellschaften unterschiedlich hohe zusätzliche Kosten entstehen. Dies ist insbesondere beim geopolitischen Szenario „Greater EU“ der Fall, da im Rahmen dieses Szenarios ein Großteil der Flüge europäischer Airlines, aber nur ein kleiner Teil der Flüge ihrer Wettbewerber von außerhalb Europas unter die jeweilige klimapolitische Maßnahme fallen. Entsprechend können sehr unterschiedliche Kostenbelastungen und damit Wettbewerbsverzerrungen die Folge sein. Hingegen sind bei den geopolitischen Szenarien „Great Aviation Countries“, „Annex-I-Countries“ sowie „World“ alle bedeutenden Fluggesellschaften bzw. der Weltluftverkehr insgesamt gleichermaßen von den jeweiligen klimapolitischen Maßnahmen betroffen.
2. Die von den Fluggesellschaften eingesetzten Fluggeräte sind je nach jeweiligem Stand der Technik, insbesondere abhängig von der Treibstoffeffizienz der Triebwerke, der Aerodynamik und den verwendeten Materialien, die das Gewicht maßbeglich beeinflussen, unterschiedlich effizient in Bezug auf die verursachten klimarelevanten Emissionen. Weiterhin spielen der Auslastungsgrad und die Länge der Flüge, die Anwendung operationeller Flugverfahren, das Höhenprofil der Flüge, das jeweilige Air Traffic Management (ATM) und viele

weitere technische und physikalische Faktoren eine große Rolle für die absoluten und die spezifischen Emissionen einer Fluggesellschaft.

3. Das Geschäftsmodell der Fluggesellschaft kann schließlich ebenfalls einen Einfluss auf ihre Kostenbelastung durch die klimapolitischen Maßnahmen haben. Grundsätzlich können folgende Geschäftsmodelle von Fluggesellschaften unterschieden werden: Netzwerkfluggesellschaften, Low Cost Carrier (LCC), Regionalfluggesellschaften und Holidaycarrier, wobei die Zuordnung und Unterscheidung im Einzelfall nicht immer eindeutig möglich ist. Diese Geschäftsmodelle werden im Folgenden zur besseren Verständlichkeit der nachfolgenden Auswertungen kurz charakterisiert.

Ein wesentliches Kennzeichen für Netzwerkfluggesellschaften ist es, dass ein Linienverkehr mit breiter geographischer Abdeckung angeboten wird, der zwischen zentralen Orten im Hub-and-Spoke-System stattfindet (Conrady et al., 2013). Als zumeist dominierende Fluggesellschaft im Heimatmarkt werden ein oder mehrere Hubs betrieben. Die an den Hubs angebotenen Langstreckenverkehre werden mit Zubringerflügen und Abbringerflügen („Feederflights“ bzw. „Defeederflights“) der eigenen Fluggesellschaft, von Tochterunternehmen und/oder Regionalfluggesellschaften kombiniert (Pompl, 2007). Während die Langstreckenflüge in der Regel mit relativ großem Fluggerät (z. B. Boeing 747, Boeing 777, Airbus 340, Airbus 380) und einem hohen Auslastungsgrad durchgeführt werden, werden die sog. Feederflights und Defeederflights zumeist mit typischen Kurz- und Mittelstreckenflugzeugen (z. B. Airbus 319, Airbus 320, Boeing 737) und einem niedrigen bis mittleren Auslastungsgrad durchgeführt. Zielgruppe der Netzwerkfluggesellschaften sind Geschäftsreisende und Privatreisende, wobei die Umsätze letztgenannter Gruppe primär der Erwirtschaftung von Deckungsbeiträgen dienen (Conrady et al., 2013). Beispiele für europäische und außereuropäische Netzwerkfluggesellschaften sind Lufthansa, Air France, British Airways, United Airlines oder Delta Air Lines.

Das Geschäftsmodell der Low Cost Carrier (LCC) beruht darauf, dass ein preisgünstiger Linienverkehr im Point-to-Point System angeboten wird. Inzwischen werden teilweise aber auch Umsteigeverbindungen angeboten, die jedoch in der Regel nicht zeitlich aufeinander abgestimmt sind und für die auch keine Durchgangstarife angeboten werden. Anders als bei den Netzwerkfluggesellschaften wird keine möglichst breite geographische Abdeckung angestrebt, vielmehr konzentrieren

sich LCC auf die aufkommensstärksten Strecken (Conrady, 2013). In der Regel operieren LCC mit einer homogenen Flugzeugflotte, die auf Kurz- und Mittelstreckenflüge ausgelegt ist. Zielgruppe der LCC sind an erster Stelle Privatreisende, zunehmend aber auch preissensitive Geschäftsreisende. Beispiele für typische LCC sind Ryanair oder easyjet in Europa sowie Southwest Airlines in den USA.

Holiday- oder Leisurecarrier führen einen Gelegenheitsverkehr zu Feriendestinationen durch. Diese früher „Charterflieger“ genannten Unternehmen bieten heute große Teile ihrer Kapazität auch direkt Privatreisenden an. Zumeist sind Holidaycarrier großen Touristikkonzernen angegliedert. Sie operieren primär kontinental, teilweise werden aber auch Interkontinentalverbindungen zu entfernteren Feriendestinationen angeboten. Die Flugzeugflotte der Holidaycarrier ist in der Regel heterogen. Zielgruppe der Holidaycarrier sind in erster Linie Privatreisende. Condor sowie Thomas Cook Airlines (UK) können exemplarisch als europäische Holidaycarrier genannt werden. Ein gutes Beispiel für die im Einzelfall fließenden Übergänge zwischen den dargestellten Geschäftsmodellen ist die Fluggesellschaft Air Berlin, auf die sowohl Merkmale eines LCC, eines Holidaycarrier und einer Netzwerkfluggesellschaft zutreffen.

Das Geschäftsmodell der Regionalfluggesellschaften beruht einerseits darauf, dass ein Linienverkehr zu dezentralen Orten im Point-to-Point-System angeboten wird. Diese Flüge weisen in der Regel sowohl ein relativ geringes Verkehrsaufkommen als auch verhältnismäßig kurze Flugstrecken auf. Andererseits bieten Regionalfluggesellschaften sog. Feederflights und Defeederflights zwischen dezentralen Orten und Hubs von Netzwerkfluggesellschaften an (Conrady et al., 2013). Ihre Flugzeugflotte ist zumeist heterogen, es werden vorwiegend kleine Flugzeuge eingesetzt. Primäre Zielgruppe dieser Fluggesellschaften sind Geschäftsreisende, vereinzelt werden aber auch Flüge für Privatreisende zu günstigen Konditionen angeboten. Beispiele für Regionalfluggesellschaften sind Skywest Airlines, ExpressJet (beide USA), Lufthansa City Line und Air Dolomiti.

Die unterschiedlichen Geschäftsmodelle der Fluggesellschaften führen systembedingt zu unterschiedlichen spezifischen klimarelevanten Emissionen. Dies wiederum führt zu einer verschiedenen hohen spezifischen und absoluten Kostenbelastung durch die klimapolitischen Instrumente. Sind Wettbewerber auf bestimmten Flugrouten bzw. Städtepaaren unterschiedlich betroffen, hat dies Effekte auf den Wettbewerb zwischen den Fluggesellschaften.

5.3.2.2 Methodischer Ansatz

Um die Kosteneffekte der klimapolitischen Instrumente auf einzelne Gruppen von Fluggesellschaften zu untersuchen, wurden im Rahmen von AviClim detaillierte Analysen vorgenommen. Die wesentlichen Ergebnisse dieser Analysen werden im Folgenden vorgestellt und diskutiert. Hierzu wurde bewusst eine Auswahl der klimapolitischen Maßnahmen, Metriken, Preis- und geopolitischen Szenarien sowie Gruppen von Fluggesellschaften getroffen, um zu möglichst aussagekräftigen Ergebnissen zu gelangen. Entsprechend konzentrieren sich die nachfolgenden Analysen in diesem Kapitel auf die klimapolitischen Instrumente „Klimasteuer“ und „Emissionshandel für alle klimarelevanten Emissionen“, die Metrik atr 50, die Preisszenarien „Low Price“ und „High Price“ sowie die geopolitischen Szenarien „Greater EU“, „Great Aviation Countries“ sowie „World“. Die Analysen zu den Wirkungen der klimapolitischen Instrumente auf die Nachfrage und die Verkehrsleistung in den nachfolgenden Kapiteln beziehen sich wieder auf sämtliche klimapolitischen Instrumente, geopolitischen Szenarien, Preisszenarien und Metriken.

Zur näheren Analyse der Kosteneffekte wurden folgende Gruppen von Fluggesellschaften differenziert nach Geschäftsmodell und geographischer Herkunft gebildet:

- 10 größte Netzwerkfluggesellschaften mit Hauptsitz in einem Land des „Greater EU“-Szenarios,
- 10 größte Netzwerkfluggesellschaften mit Hauptsitz in einem Land außerhalb des „Greater EU“-Szenarios,
- 10 größte Low Cost Carrier/Holidaycarrier mit Hauptsitz in einem Land des „Greater EU“-Szenarios

sowie

- 10 größte Netzwerkfluggesellschaften mit Hauptsitz in einem Land des „Great Aviation Countries“-Szenarios,
- 10 größte Netzwerkfluggesellschaften mit Hauptsitz in einem Land außerhalb des „Great Aviation Countries“-Szenarios,
- 10 größte Low Cost Carrier/Holidaycarrier mit Hauptsitz in einem Land des „Great Aviation Countries“-Szenarios,

sowie

- 10 größte Netzwerkfluggesellschaften der Welt (Szenario „World“),
- 10 größte Low Cost Carrier/Holidaycarrier der Welt (Szenario „World“).

Basis der Zuordnung waren empirische Daten zum Personenverkehr (RPK) des Jahres 2010. Hintergrund für diese Auswahl von Gruppen von Fluggesellschaften war einerseits die Überlegung, dass die Analyse und Prognose der Entwicklung einzelner Fluggesellschaften mit zu vielen Unsicherheiten behaftet ist. Denn hier spielen betriebswirtschaftliche Strategien und Marktentwicklungen eine Rolle, die für Unternehmensfremde schwer einzuschätzen sind. Andererseits würde eine Analyse sämtlicher gut 250 im Weltflugplan aufgeführter Fluggesellschaften sehr aufwändig sein und aufgrund von Zuordnungsproblemen zu den drei o. g. Geschäftsmodellen zu wenig belastbaren Ergebnissen führen. Aufgrund dessen wurden Gruppen der jeweils 10 größten Netzwerkfluggesellschaften sowie 10 größten Low Cost Carrier/Holidaycarrier mit Sitz in einem der Länder, die unter das jeweilige geopolitische Szenario fallen bzw. davon ausgeschlossen sind, gebildet. Die Regionalfluggesellschaften wurden an dieser Stelle nicht näher analysiert, da sie - mit einigen Ausnahmen – im Hinblick auf die angebotene und verkaufte Verkehrsleistung sowohl was die Umsätze als auch die Flugstrecken betrifft, als eher unbedeutend im Gesamtgefüge der Fluggesellschaften betrachtet werden können. Darüber hinaus operieren die meisten Regionalfluggesellschaften national bzw. im nahen kontinentalen Umfeld, so dass aussagekräftige Ergebnisse, die durch einen Vergleich der drei untersuchten geopolitischen Szenarien zustande kommen, kaum erwartet werden können.

Hierbei ist zu berücksichtigen, dass diese Rangfolgen sich auf Angaben der Zeitschrift ‚Airline Business‘ für das Basisjahr 2010 beziehen, mithin nicht mehr aktuell sind und einige der aufgeführten Fluggesellschaften in dieser Form im Jahr 2014 nicht mehr existieren. So fusionierte beispielsweise Continental Airlines im Jahr 2010/2011 mit United Airlines und gab den Markennamen zugunsten von United Airlines auf. Da sämtliche Berechnungen und Modelle, die im Rahmen von AviClim zum Einsatz kommen, auf dem Basisjahr 2010 beruhen, konnte aber für diese Analysen modellbedingt kein aktuelleres Basisjahr gewählt werden. Darüber hinaus zeigt ein Blick auf die Rangfolgen der Jahre 2009 – 2013, dass sich innerhalb der Spitzengruppe zwar immer wieder Veränderungen ergeben, diese aber im wesentlichen darauf beruhen, dass die Reihenfolge getauscht wird oder Unternehmen miteinander fusionieren. Mithin können die Spitzengruppen der Fluggesellschaften in den jeweiligen Kategorien als relativ stabil im Zeitraum 2009-2013 betrachtet werden.

Laut Angaben der Zeitschrift ‚Airline Business‘ (2011), die regelmäßig belastbare empirische Daten zur Entwicklung von Fluggesellschaften, Flughäfen und weiteren Größen im Weltluftverkehr veröffentlicht, setzte sich die Gruppe der 10 größten Netzwerkfluggesellschaften mit Hauptsitz in einem der Länder des „Greater EU“-Szenarios aus den Fluggesellschaften: Lufthansa, Air France, British Airways, KLM, Iberia, Virgin Atlantic Airways, Alitalia, TAP Portugal, Scandinavian Airlines (SAS) und Finnair zusammen. Die 10 größten Netzwerkfluggesellschaften von außerhalb des Gebiets des „Greater EU“-Szenarios waren im Jahr 2010: Delta Air Lines, American Airlines, United Airlines, Emirates, Continental Airlines, China Southern Airlines, Qantas, Cathay Pacific, US Airways und Air China. Zu den 10 größten LCC/Holidaycarrier mit Hauptsitz in einem der Länder des „Greater EU“-Szenarios gehörten im Jahr 2010: Ryanair, easyjet, Air Berlin, Thomson Airways, Thomas Cook Airways (UK), Condor Flugdienst, Air Europa, TUIfly, Monarch Airlines und Aer Lingus.

Im Szenario „Great Aviation Countries“ zeigt sich ein etwas anderes Bild. Nun gehören zu den größten 10 Netzwerkfluggesellschaften, deren Flüge unter dieses Szenario fallen: Delta Air Lines, American Airlines, United Airlines, Emirates, Lufthansa, Continental Airlines, Air France, China Southern Airlines, British Airways und Qantas. Hingegen zählten im Jahr 2010 folgende Netzwerkfluggesellschaften mit Sitz außerhalb der Länder des „Great Aviation Countries“-Szenarios zu den 10 größten Fluggesellschaften: Thai Airways International, Qatar Airways, Turkish Airlines (THY), Malaysia Airlines, Saudi Arabian Airlines, LAN Airlines, China Airlines, Air New Zealand, South African Airways und Garuda Indonesia Airways. Die größten 10 LCC/Holidaycarrier mit Hauptsitz in einem der Staaten des „Great Aviation Countries“-Szenarios waren im Jahr 2010: Southwest Airlines, Ryanair, easyjet, JetBlue Airways (US), Air Berlin, Thomson Airways, AirTran Airways, GOL Linhas Aéreas Inteligentes, Thomas Cook Airlines (UK) und WestJet Airlines (Canada).

Im Szenario „World“ sind – wenig überraschend – die im Szenario „Great Aviation Countries“ genannten Netzwerkfluggesellschaften und LCC/Holidaycarrier in identischer Reihenfolge vertreten. Eine detailliertere Analyse lohnt dennoch, da hier alle Flüge und nicht nur die Flüge von und nach Ländern des „Great Aviation Countries“-Szenarios dem jeweiligen klimapolitischen Instrument unterliegen.

Bei der Modellierung der Kosten der klimapolitischen Instrumente wurde folgendermaßen vorgegangen: Zunächst wurden die Verkehrsleistung des Jahres 2010 (Revenue Ton Kilometers; RTK) und

die klimarelevanten Emissionen für die einzelnen Fluggesellschaften aus dem Gesamtmodell abgefragt. Dies geschah differenziert nach geopolitischen Szenarien und Zieljahren.

Die Berechnung der Klimasteuer erfolgte durch Gewichtung der einzelwirtschaftlichen klimarelevanten Emissionen, die unter das jeweilige geopolitische Szenario fallen, mit der jeweiligen Metrik. Diese wurden danach mit dem Preis, der pro Tonne CO₂-Äquivalent von der jeweiligen Fluggesellschaft zu entrichten ist, multipliziert. Auf diese Weise wurden die Kosten für die Klimasteuer für die einzelnen Fluggesellschaften errechnet. Die Summe dieser Kosten über alle jeweils betrachteten Fluggesellschaften entspricht der von der entsprechenden Gruppe von Fluggesellschaften zu entrichtenden Klimasteuer.

Zur quantitativen Abschätzung des Emissionshandels wurde ein mehrstufiges Verfahren angewandt: Ausgangsbasis war das Cap für das jeweilige geopolitische Szenario. Dies wurde, wie in den Kapiteln 4 und 5.3.1 dargelegt, annahmegemäß in Höhe der Gesamtmenge an klimarelevanten Emissionen aller Flüge des Jahres 2010, die unter das jeweilige geopolitische Szenario fallen, festgelegt. Damit fallen beispielsweise im Szenario „Greater EU“ alle klimarelevanten Emissionen der Flüge von, nach und innerhalb dieser Ländergruppe unter den Emissionshandel. Diese Emissionsmenge wurde analog zur Klimasteuer mit der jeweiligen Metrik für die einzelnen Gase gewichtet. Sie entspricht der Gesamtmenge an Emissionsrechten, ausgedrückt in Mio. Tonnen CO₂-Äquivalent, die für den Luftverkehrssektor in diesem geopolitischen Szenario geschaffen werden. Von dieser Gesamtmenge werden annahmegemäß 85 % gratis an die Fluggesellschaften ausgegeben, die Restmenge wird versteigert. Die Methode zur Berechnung der an die einzelnen Fluggesellschaften gratis zu vergebenden Menge an Emissionsrechten wurde in Anlehnung an die entsprechende Regelung im EU-ETS entworfen. Entsprechend wird im Rahmen von AviClim ein Benchmark ermittelt, auf dessen Basis die Erstaussgabe an Emissionsrechten grundsätzlich stattfindet. Allerdings wurde von einer Modellierung der zahlreichen Ausnahmeregelungen und Sonderbestimmungen, z. B. zur Berechnung der individuellen RTK im Monitoringjahr 2010 im EU-ETS abgesehen, um die Berechnung handhabbar zu gestalten und eine Erklärbarkeit der Ergebnisse zu gewährleisten. Der AviClim-Benchmark für die jeweiligen geopolitischen Szenarien bleibt, analog zum EU-ETS, für alle Zieljahre konstant. Er unterscheidet sich jedoch zwischen den einzelnen geopolitischen Szenarien, da jeweils verschiedene Gesamtmengen an klimarelevanten Emissionen und unterschiedliche Verkehrsleistungen unter die geopolitischen Szenarien fallen.

Die Methode zur Berechnung eines Benchmarks für den Luftverkehr wurde u. a. in Scheelhaase et al. (2010) detailliert beschrieben. Kurz gefasst wird die Summe an CO₂-Äquivalenten eines Basisjahres (AviClim: 2010) mit dem Anteil an gratis zu vergebenden Emissionsrechten (AviClim: 85%) gewichtet. Das Ergebnis wird im Rahmen von AviClim dann ins Verhältnis zur Verkehrsleistung des Jahres 2010 gesetzt. Damit wird an dieser Stelle ebenfalls von der entsprechenden Regelung im EU-ETS abgewichen, denn dort werden die Emissionen des Durchschnitts der Jahre 2004 – 2006, gewichtet mit dem Anteil der Gratisausgabe und einem Erfüllungsfaktor (2012: 97%), ins Verhältnis zur Verkehrsleistung des Jahres 2010 gesetzt. Der von uns gewählte Ansatz hat den Vorteil, dass er modelltechnisch einfacher zu handhaben ist und die Ergebnisse eindeutiger interpretiert werden können.

Der auf diese Weise im Rahmen von AviClim berechnete Benchmark kann als Maß für die ökologische Effizienz der Flüge, die unter das jeweilige geopolitische Szenario fallen, angesehen werden. Im Szenario „Greater EU“ beträgt der Benchmark: 2,817 Tonnen CO₂-Äquivalent/1.000 RTK, im Szenario „Great Aviation Countries“ liegt er mit 2,940 Tonnen CO₂-Äquivalent/1.000 RTK etwas darüber, im Szenario „World“ schließlich beträgt er 2,952 Tonnen CO₂-Äquivalent/1.000 RTK. Dies zeigt bereits die bestehenden Unterschiede in der ökologischen Effizienz zwischen den Flügen und Fluggesellschaften weltweit. Offenbar zeichnen sich insbesondere die Flüge, die im Jahr 2010 von, nach und innerhalb der Länder des „Greater EU“-Szenarios durchgeführt wurden, durch eine etwas höhere ökologische Effizienz aus als die übrigen Flüge in diesem Jahr. Ob dies auf die ökologische Effizienz der Fluggesellschaften, und/oder die Charakteristika der Flüge, die unter die jeweiligen geopolitischen Szenarien fallen, zurückgeführt werden kann, wird im nachfolgenden Abschnitt näher erörtert.

Die Erstausrüstung der Fluggesellschaften errechnet sich sodann durch die Multiplikation der individuellen Verkehrsleistung der jeweiligen Fluggesellschaft des Jahres 2010 mit dem Benchmark. Auf diese Weise erhalten sehr effiziente Fluggesellschaften eine etwas größere Menge an Emissionsrechten gratis zugeteilt, während vergleichsweise wenig effiziente Airlines relativ weniger Emissionsrechte pro RTK erhalten. Maßnahmen zur Effizienzsteigerungen, die in der Vergangenheit stattgefunden haben, werden auf diese Weise honoriert.

Die Kostenbelastung der individuellen Fluggesellschaften durch den Emissionshandel lässt sich durch den Vergleich der klimarelevanten Emissionen des jeweiligen Zieljahres mit der jedes Jahr konstanten Menge an gratis zugeteilten Emissionsrechten quantifizieren. Die Differenz zwischen diesen Größen ist der Zukaufsbedarf an Emissionsrechten, der mit den Preisen pro Emissionsrecht multipliziert die Kosten für die Teilnahme am Emissionshandel für die individuelle Fluggesellschaft abbildet. Bildet man schließlich die Summe über die jeweils betrachteten Gruppen von Fluggesellschaften, resultieren die Gesamtkosten für die Teilnahme am Emissionshandel für diese nach Geschäftsmodell unterschiedenen Airlinegruppen in den geopolitischen Szenarien und Zieljahren.

5.3.2.3 Ergebnisse

Die nachfolgenden Tabellen zeigen die Kosten der verschiedenen Gruppen von Fluggesellschaften für die klimapolitischen Instrumente ‚Klimasteuer‘ und ‚Emissionshandel für alle klimarelevanten Gase‘ für die geopolitischen Szenarien „Greater EU“, „Great Aviation Countries“ und „World“, für die Metrik atr 50 und für die Preisszenarien „Low Price“ und „High Price“. Aufschlussreich sind bei beiden klimapolitischen Instrumenten neben der absoluten Kostenbelastung auch die spezifischen Kosten pro RTK.

Tabelle 5-11: Absolute Kostenbelastung ausgewählter Gruppen von Fluggesellschaften durch die Klimasteuer und den Emissionshandel

Scenario/Group of Airlines	Low Price Scenario, Costs in USD million					High Price Scenario, Costs in USD million				
	2010	2015	2020	2025	2030	2010	2015	2020	2025	2030
Emissions Trading all species										
Top 10 "Greater EU" Network Carrier	399	1696	3677	6513	8753	399	2827	7354	15631	23342
Top 10 Non-"Greater EU" Network Carrier	152	669	1451	2378	3647	152	1116	2902	5707	9727
Top 10 "Greater EU" LCC/Holiday Carrier	141	487	1001	1526	2193	141	811	2002	3662	5849
Top 10 "Great Aviation Countries" Network Carrier	1040	3363	7753	12835	19600	1040	5605	15506	30803	52267
Top 10 Non-"Great Aviation Countries" Network Carrier	155	816	1862	3143	4777	155	1360	3723	7544	12739
Top 10 "Great Aviation Countries" LCC/Holiday Carrier	242	819	1631	2481	3578	242	1365	3261	5955	9540
Top 10 "World" Network Carrier	982	4158	8892	14342	21533	982	6930	17784	34420	57420
Top 10 "World" LCC/Holiday Carrier	249	843	1680	2145	3693	249	1406	3360	4487	9847
Scenario/Group of Airlines	Low Price Scenario, Costs in USD million					High Price Scenario, Costs in USD million				
Climate Tax	2010	2015	2020	2025	2030	2010	2015	2020	2025	2030
Top 10 "Greater EU" Network Carrier	2658	5085	8195	12160	15530	2658	8474	16390	29184	41414
Top 10 Non-"Greater EU" Network Carrier	1013	1960	3173	4530	6230	1013	3267	6345	10871	16612
Top 10 "Greater EU" LCC/Holiday Carrier	938	1682	2595	3518	4584	938	2804	5190	8444	12224
Top 10 "Great Aviation Countries" Network Carrier	6934	12204	19541	27569	37282	6934	20340	39082	66167	99419
Top 10 Non-"Great Aviation Countries" Network Carrier	1036	2137	3622	5344	7418	1036	3561	7245	12826	19782
Top 10 "Great Aviation Countries" LCC/Holiday Carrier	1613	2875	4372	5908	7690	1613	4792	8745	14180	20507
Top 10 "World" Network Carrier	6546	10683	20020	28252	38225	6546	17805	40040	67804	101933
Top 10 "World" LCC/Holiday Carrier	1661	2962	4504	5160	7929	1661	4936	9008	10896	21145

Quelle: Eigene Berechnungen. In Preisen von 2012. Ergebnisse für atr 50.

Tabelle 5-12: Spezifische Kostenbelastung ausgewählter Gruppen von Fluggesellschaften durch die Klimasteuer und den Emissionshandel

Scenario/Group of Airlines	Low Price Scenario, Costs/RTK in USD					High Price Scenario, Costs/RTK in USD				
	2010	2015	2020	2025	2030	2010	2015	2020	2025	2030
Emissions Trading all species										
Top 10 "Greater EU" Network Carrier	0.005	0.016	0.028	0.041	0.045	0.005	0.027	0.056	0.098	0.120
Top 10 Non-"Greater EU" Network Carrier	0.005	0.017	0.029	0.037	0.046	0.005	0.028	0.057	0.090	0.122
Top 10 "Greater EU" LCC/Holiday Carrier	0.005	0.015	0.026	0.034	0.042	0.005	0.026	0.052	0.081	0.111
Top 10 "Great Aviation Countries" Network Carrier	0.006	0.015	0.027	0.038	0.045	0.006	0.024	0.053	0.091	0.119
Top 10 Non-"Great Aviation Countries" Network Carrier	0.005	0.018	0.032	0.042	0.050	0.005	0.030	0.063	0.100	0.134
Top 10 "Great Aviation Countries" LCC/Holiday Carrier	0.006	0.017	0.028	0.036	0.045	0.006	0.028	0.056	0.087	0.120
Top 10 "World" Network Carrier	0.005	0.018	0.030	0.040	0.049	0.005	0.030	0.061	0.096	0.130
Top 10 "World" LCC/Holiday Carrier	0.006	0.017	0.029	0.032	0.046	0.006	0.029	0.057	0.066	0.122
Average	0.005	0.017	0.029	0.037	0.046	0.005	0.028	0.057	0.089	0.122
Scenario/Group of Airlines	Low Price Scenario, Costs/RTK in USD					High Price Scenario, Costs/RTK in USD				
Climate Tax	2010	2015	2020	2025	2030	2010	2015	2020	2025	2030
Top 10 "Greater EU" Network Carrier	0.032	0.049	0.063	0.077	0.080	0.032	0.081	0.126	0.184	0.213
Top 10 Non-"Greater EU" Network Carrier	0.033	0.049	0.061	0.071	0.078	0.033	0.082	0.125	0.171	0.209
Top 10 "Greater EU" LCC/Holiday Carrier	0.036	0.053	0.068	0.078	0.087	0.036	0.088	0.136	0.187	0.232
Top 10 "Great Aviation Countries" Network Carrier	0.039	0.053	0.067	0.081	0.085	0.039	0.088	0.134	0.196	0.226
Top 10 Non-"Great Aviation Countries" Network Carrier	0.030	0.047	0.061	0.071	0.078	0.030	0.078	0.123	0.171	0.208
Top 10 "Great Aviation Countries" LCC/Holiday Carrier	0.041	0.059	0.075	0.086	0.096	0.041	0.098	0.150	0.207	0.257
Top 10 "World" Network Carrier	0.036	0.046	0.068	0.078	0.086	0.036	0.076	0.137	0.188	0.230
Top 10 "World" LCC/Holiday Carrier	0.042	0.061	0.077	0.076	0.098	0.042	0.101	0.154	0.160	0.262
Average	0.036	0.052	0.068	0.077	0.086	0.036	0.087	0.136	0.183	0.230

Quelle: Eigene Berechnungen. In Preisen von 2012. Ergebnisse für atr 50.

Wie die Tabellen veranschaulichen, unterscheidet sich sowohl die absolute als auch die spezifische Kostenbelastung durch die klimapolitischen Instrumente teilweise recht deutlich innerhalb und insbesondere zwischen den jeweiligen geopolitischen Szenarien. Absolut betrachtet resultiert die jeweils größte Kostenbelastung bei denjenigen Fluggesellschaften, deren Hauptsitz sich in einem der Länder befindet, die unter das jeweilige geopolitische Szenario fallen. So verursacht beispielsweise die Klimasteuer bei den größten 10 Netzwerkfluggesellschaften mit dem Hauptsitz in der „Greater EU“ im Jahr 2030 Kosten in Höhe von 15,53 Mrd. USD (Low Price Scenario). Hingegen entstehen bei ihren Konkurrenten von außerhalb der „Greater EU“-Staaten im gleichen Jahr Kosten von etwa 6,23 Mrd. USD. Dies kann damit begründet werden, dass die überwiegende Zahl der Flüge von Fluggesellschaften mit ihrem Hauptsitz in einem der „Greater EU“-Staaten in diesem geopolitischen Szenario unter das jeweilige klimapolitische Instrument fällt, während dies bei ihren Konkurrenten nur für diejenigen Flüge der Fall ist, die von oder nach Europa durchgeführt werden. So fallen beispielsweise im Szenario „Greater EU“ im Jahr 2030 bei der Lufthansa etwa 90 Prozent der insgesamt verkauften Tonnenkilometer (RTK) unter das jeweilige klimapolitische Instrument, hingegen beim Wettbewerber United Airlines nur etwa 18 Prozent aller RTK. Hieraus resultiert ein merklicher Wettbewerbsnachteil für alle Fluggesellschaften, deren Hauptsitz sich in einem der Länder befindet, das unter das geopolitische Szenario fällt und die sowohl innerhalb als auch außerhalb der jeweiligen Weltregion Transportdienstleistungen anbieten.

Die Analyse der spezifischen Kostenbelastung zeigt ein heterogenes Bild: Teilweise fallen die spezifischen Kosten derjenigen Netzwerkfluggesellschaften, die aus einem Land stammen, das unter das jeweilige geopolitische Szenario fällt, niedriger aus als die spezifische Kostenbelastung ihrer Konkurrenten von außerhalb des angenommenen geopolitischen Szenarios. Dies ist beispielsweise beim Instrument des Emissionshandels im Szenario „Great Aviation Countries“ ab dem Jahr 2015 zu beobachten. Hingegen sind bei der Klimasteuer teilweise umgekehrte Kostenentwicklungen zu verzeichnen: So steigen beispielsweise die spezifischen Kosten der Top 10 Netzwerkfluggesellschaften aus den „Great Aviation Countries“ im Jahr 2030 um etwa 0,085 USD pro RTK, während sich die spezifischen Kosten ihrer Konkurrenten von außerhalb der „Great Aviation Countries“ im gleichen Jahr um circa 0,078 USD/RTK erhöhen.

Neben den absoluten und spezifischen Kosten sind die durchschnittlichen spezifischen Emissionen, also die Menge an CO₂-Äquivalenten pro 1.000 RTK, von großer Bedeutung für die finanzielle Belastung der Fluggesellschaften durch die klimapolitischen Instrumente. Darüber hinaus ist beim klimapolitischen Instrument des Emissionshandels der sog. Erfüllungsfaktor, also der Anteil

der gratis zugeteilten Emissionsrechte im Verhältnis zu den gesamten klimarelevanten Emissionen der jeweiligen Fluggesellschaft, eine wichtige Größe. Die nachfolgende Tabelle zeigt die spezifischen Emissionen der verschiedenen Gruppen von Fluggesellschaften und deren Entwicklung im Zeitverlauf sowie die Veränderung des Erfüllungsfaktors differenziert nach Airlinegruppen und geopolitischen Szenarien.

Tabelle 5-13: Veränderung der spezifischen Emissionen (t CO₂-Äquivalent/1000 RTK) und des Erfüllungsfaktors (in Prozent) für ausgewählte Gruppen von Fluggesellschaften

Scenario/Group of Airlines	Specific emissions (t CO ₂ equivalent/1000 RTK)					Percentage of free allocation of emission permits				
	2010	2015	2020	2025	2030	2010	2015	2020	2025	2030
Top 10 "Greater EU" Network Carrier	3.42	3.44	3.33	3.15	2.83	85 %	67 %	56 %	49 %	45 %
Top 10 Non-"Greater EU" Network Carrier	3.30	3.25	3.14	2.91	2.69	85 %	64 %	52 %	46 %	40 %
Top 10 "Greater EU" LCC/Holiday Carrier	3.63	3.55	3.39	3.12	2.88	85 %	71 %	62 %	57 %	53 %
Top 10 "Great Aviation Countries" Network Carrier	3.74	3.52	3.38	3.11	2.86	85 %	69 %	58 %	51 %	46 %
Top 10 Non-"Great Aviation Countries" Network Carrier	3.26	3.30	3.22	2.97	2.73	85 %	63 %	50 %	43 %	37 %
Top 10 "Great Aviation Countries" LCC/Holiday Carrier	4.07	3.94	3.77	3.47	3.26	85 %	71 %	63 %	58 %	54 %
Top 10 "World" Network Carrier	3.62	3.59	3.45	3.17	2.92	85 %	66 %	55 %	49 %	43 %
Top 10 "World" LCC/Holiday Carrier	4.18	4.05	3.87	3.62	3.30	85 %	71 %	63 %	58 %	54 %
Average	3.65	3.58	3.44	3.19	2.93	85 %	68 %	57 %	51 %	47 %

Quelle: Eigene Berechnungen. In Preisen von 2012. Ergebnisse für atr 50.

Wie aus obiger Tabelle ersichtlich, sinken die spezifischen klimarelevanten Emissionen, ausgedrückt in Tonnen CO₂-Äquivalent pro 1.000 RTK im Betrachtungszeitraum 2010-2030. Dies gilt für alle hier näher untersuchten Gruppen von Fluggesellschaften: Im Durchschnitt sinken die spezifischen klimarelevanten Emissionen von 3,65 t CO₂-Äquivalent/1.000 RTK im Jahr 2010 auf 2,93 t CO₂-Äquivalent/1.000 RTK (2030). Hier zeigt sich der Einfluss des autonomen technischen

Fortschritts, der zu einer Verringerung der gesamten spezifischen klimarelevanten Emissionen des Luftverkehrs führt.

Beim Vergleich der Entwicklung der spezifischen klimarelevanten Emissionen der verschiedenen Gruppen von Fluggesellschaften zeigen sich erwartungsgemäß größere Unterschiede. Insbesondere diejenigen Gruppen von Fluggesellschaften, die besonders treibstoffeffizient operieren (LCC und Holiday Carrier), weisen zu Beginn des Betrachtungszeitraums deutlich höhere spezifische klimarelevante Emissionen auf als andere Gruppen von Airlines. So verursachen beispielsweise die TOP 10 LCC/Holiday Carrier im „Greater EU“-Szenario im Jahr 2010 spezifische klimarelevante Emissionen in Höhe von 3,63 t CO₂-Äquivalent/1.000 RTK, während die Top 10 Network Carrier mit einem Hauptsitz außerhalb der „Greater EU“ nur etwa 3,30 t CO₂-Äquivalent pro 1.000 RTK emittieren. Diese Unterschiede lassen sich mit dem technisch bedingten trade-off zwischen einer Treibstoff- (und damit CO₂-) Optimierung der Triebwerke auf der einen Seite und einer Optimierung im Hinblick auf andere klimarelevante Emissionen des Luftverkehrs (insbesondere NO_x-Emissionen) auf der anderen Seite erklären. Denn die heute gängigen Triebwerkstechnologien können technologisch entweder in die eine oder andere Richtung optimiert werden. Mit zunehmendem Einsatz neuartiger Triebwerkstypen, bei denen dieser trade-off nur noch in abgeschwächter Form zutage tritt, werden die Unterschiede zwischen den verschiedenen Gruppen von Fluggesellschaften im Zeitablauf immer kleiner. So emittieren beispielsweise die Top 10 Network Carrier mit einem Hauptsitz innerhalb der „Greater EU“-Staaten im Jahr 2030 etwa 2,83 t CO₂-Äquivalent/1.000 RTK und die Gruppe der 10 größten LCC/Holiday Carrier mit einem Hauptsitz innerhalb der „Greater EU“ dann circa 2,88 t CO₂-Äquivalent pro 1.000 RTK.

Im Rahmen des Handels mit Emissionsrechten ist der Erfüllungsfaktor eine wichtige Größe, wie bereits oben dargelegt wurde. Denn anhand dieses Faktors lässt sich abschätzen, in welchem Umfang Emissionsrechte von Seiten der Fluggesellschaften zugekauft werden müssen. Im Jahr 2010 beträgt dieser Erfüllungsfaktor unabhängig vom geopolitischen Szenario und vom Geschäftsmodell der Fluggesellschaften 85%. Dies liegt in den Annahmen zur Gratisvergabe an Emissionsrechten begründet. Da die gratis ausgegebene Menge an Emissionsrechten im Zeitverlauf konstant bleibt, die Zahl der Flüge und die verursachten klimarelevanten Emissionen im Betrachtungszeitraum hingegen steigen, erhöht sich die Menge an zuzukaufenden Emissionsrechten. Entsprechend sinkt der Erfüllungsfaktor. Im Durchschnitt über alle hier näher betrachteten Gruppen von Fluggesellschaften sinkt der Erfüllungsfaktor von 85 % im Jahr 2010 auf 46,8 % im Jahr 2030. Damit müssen im Jahr 2030 im Durchschnitt über alle Fluggesellschaften für mehr als die Hälfte der klimarelevanten Emissionen Emissionsrechte erworben werden.

Allerdings treten je nach Geschäftsmodell der Fluggesellschaften z. T. deutliche Unterschiede hinsichtlich des Erfüllungsfaktors auf: Die Gruppe der LCC- und Holiday Carrier weist in der Regel die höchsten Erfüllungsfaktoren im Vergleich zu den Netzwerkfluggesellschaften im jeweiligen geopolitischen Szenario auf. Dies gilt ab dem Jahr 2015 für alle analysierten geopolitischen Szenarien. Bemerkenswert ist weiterhin, dass der Erfüllungsfaktor derjenigen Netzwerkfluggesellschaften, die aus einem Land stammen, das unter das jeweilige geopolitische Szenario fällt, regelmäßig höher ausfällt als der ihrer Konkurrenten von außerhalb des betreffenden geopolitischen Szenarios. So erhalten beispielsweise die Netzwerkfluggesellschaften aus einem Land, das zu den „Great Aviation Countries“ zählt, im Jahr 2020 Emissionsrechte für etwa 57,7 Prozent ihrer klimarelevanten Emissionen gratis zugeteilt. Hingegen bekommen ihre Konkurrenten aus Ländern, die nicht zu den „Great Aviation Countries“ zählen, unentgeltliche Emissionsrechte nur in Höhe von etwa 50,4 Prozent ihrer klimarelevanten Emissionen.

Dies kann auf mehrere Ursachen zurückgeführt werden: Erstens spielen die spezifischen klimarelevanten Emissionen (t CO₂-Äquivalent/1.000 RTK) der jeweiligen Flüge eine große Rolle. Je kleiner die spezifischen Emissionen, desto günstiger entwickelt sich der Erfüllungsfaktor. Weitere wichtige Einflussgrößen für den Erfüllungsfaktor sind zweitens die prognostizierten Wachstumsraten für die Flugstrecken, die die jeweilige Fluggesellschaft anbietet. Diese unterscheiden sich insbesondere nach Weltregionen in der mittleren Frist relativ deutlich. So werden der europäische und nordamerikanische Markt zukünftig als relativ gesättigt betrachtet, vor allem in Asien hingegen deutliche Zuwächse erwartet (Airbus, 2012). Entsprechend unterschiedlich werden sich die prognostizierten absoluten klimarelevanten Emissionen entwickeln, was wiederum einen unmittelbaren Einfluss auf den Erfüllungsfaktor hat. Drittens hat die Länge der Flüge, die unter das jeweilige klimapolitische Instrument fallen, einen großen Einfluss auf den Erfüllungsfaktor. Unseren Berechnungen zufolge entstehen auf Langstreckenflügen in der Regel deutlich größere Mengen an klimarelevanten Gasen pro Flugkilometer als dies auf kürzeren Flügen der Fall ist. Somit sind insbesondere die Flüge der LCC- und Holiday Carrier sowie die Feeder- und Defeederflights der Netzwerkfluggesellschaften, die innerhalb des jeweiligen geopolitischen Szenarios durchgeführt werden, aufgrund ihrer Fluglänge relativ begünstigt. Dies hat zur Folge, dass der Erfüllungsfaktor derjenigen Fluggesellschaften, die ihren Hauptsitz außerhalb der Staaten haben, die unter das jeweilige geopolitische Szenario fallen, tendenziell niedriger ausfällt als der ihrer Konkurrenten aus Ländern innerhalb des jeweiligen Szenarios. Dies kann bemerkenswerterweise als Wettbewerbsnachteil für diejenigen Fluggesellschaften interpretiert werden, die ihren Hauptsitz außerhalb eines Landes haben, das Klimapolitik im Luftverkehr aktiv unterstützt.

5.4 Nachfrageeffekte der klimapolitischen Maßnahmen

Die dargestellten Kosten der klimapolitischen Instrumente im Luftverkehr werden die Produktionskosten der Fluggesellschaften erhöhen. In welchem Umfang hiervon das Unternehmensergebnis, also die Gewinne oder Verluste der Fluggesellschaften betroffen sein werden, hängt davon ab, ob und in welchem Umfang diese Kostenerhöhung an die Nachfrager nach Luftverkehrsdienstleistungen weitergegeben werden kann. Ökonomisch spricht man hier von einer Überwälzung. Maßgeblich für die Überwälzungsmöglichkeiten sind die bereits mehrfach im Rahmen dieses Berichts angesprochenen Preiselastizitäten der Luftverkehrsnachfrage.

Allgemein sind Preiselastizitäten der Nachfrage definiert als der Quotient aus relativer (prozentualer) Mengenänderung und relativer (prozentualer) Preisänderung. Die Preiselastizität der Nachfrage gibt also an, um wie viel Prozent sich die von einem Gut nachgefragte Menge ändert, wenn sich der Preis dieses Gutes um ein Prozent verändert (Brösse, 1992). Entsprechend dieser Definition und da in der Regel von einer gekrümmten Nachfragekurve auszugehen ist, wird die Preiselastizität der Nachfrage zumeist für jeden Punkt der Nachfragekurve verschieden sein. Es wird daher in der Ökonomie in der Regel mit Punktelastizitäten gearbeitet.

Empirisch ermittelte Preiselastizitäten im Verkehrsbereich, insbesondere im Luftverkehrsbereich, sind selten zu finden. Hierbei ist zudem zu berücksichtigen, dass diese Preiselastizitäten stark von der jeweiligen Nachfragergruppe (Geschäfts-/Privatreisende bzw. unterschiedliche Versendergruppen im Integrator- oder Frachtbereich) und von der konkreten Flugstrecke abhängen. Sind beispielsweise Substitute für den jeweiligen Flug verfügbar, wovon im Kurzstreckenverkehr in der Regel auszugehen ist, wird sich die Preiselastizität der Nachfrage anders (sprich: elastischer) verhalten als im Langstreckenbereich, wo vergleichbare Substitute fehlen. Auch die Wettbewerbssituation auf der jeweiligen Flugstrecke hat einen großen Einfluss auf die Überwälzungsmöglichkeiten. Einen Überblick über empirisch ermittelte Preiselastizitäten der Nachfrage im Verkehrsbereich, differenziert nach Verkehrsmodi sowie für verschiedene Marktsegmente des Luftverkehrsbereichs vermitteln die nachfolgenden beiden Tabellen.

Tabelle 5-14: Preiselastizitäten der Nachfrage im Personenverkehr differenziert nach Reisezweck und Verkehrsträger

Mode	Range Surveyed		Most Likely Range	No. of Studies
	Market Demand Elasticities	Mode Choice Elasticities		
Air ^a :				
Vacation	-0.40 to -4.60	-0.38	-1.10 to -2.70	8
Non-Vacation	-0.08 to -4.18	-0.18	-0.40 to -1.20	6
Mixed ^b	-0.44 to -4.51	-0.26 to -5.26	-0.70 to -2.10	14
Automobile:				
Peak	-0.12 to -0.49	-0.02 to -2.69	-0.10 to -0.70	9
Off Peak	-0.06 to -0.88	-0.16 to -0.96	-0.20 to -1.10	6
All Day ^b	0.00 to -0.52	-0.01 to -1.26	-0.10 to -1.10	7
Bus:				
Peak	0.00	-0.03 to -0.58	-0.10 to -0.70	6
Off Peak	-1.08 to -1.54	-0.01 to -0.69	-0.10 to -1.10	3
All Day ^b	-0.10 to -1.62	-0.03 to -0.70	-0.10 to -1.30	11

^a The distinction between vacation and non-vacation routes is rather arbitrary in most studies. This may partly account for the very wide range of elasticities estimates reported. ^b This category includes studies that do not make the distinctions. Quelle: In Anlehnung an Oum et al. (1990).

Tabelle 5-15: Preiselastizitäten der Nachfrage im Luftverkehrsbereich

Author	Country/Region	Research Category	Elasticity
Gillen et al. (2004)	Various	Short-haul business	-0.70
		Short-haul leisure	-1.52
Oum et al. (1992)	Various	Leisure	-0.40 to -1.98
		Business	-0.65
		Mixed	-0.82
Nairn and Hooper (1992)	Various	Leisure & Business	-0.70 to -2.10
Oum et al. (1990)	Various	Vacation	-0.40 to -4.60
		Non-vacation	-0.08 to -4.18
		Mixed	-0.44 to -4.51
Fridström and Thune-Larsen (1989)	Norway	Short and medium term	-0.82
		Very long term	-1.63
Oum et al. (1986)	USA	First class	-0.60 to -0.85
		Economy non-vacation	-1.31 to -1.43
		Economy vacation	-1.48 to -1.60
		Discount	-1.55 to -2.01

Quelle: Lu (2009).

Wie aus den Tabellen ersichtlich, ist von einer relativ großen Unsicherheit hinsichtlich der konkreten Höhe der empirischen Preiselastizitäten im Luftverkehr auszugehen. Zur Modellierung der Nachfrageeffekte der klimapolitischen Maßnahmen im Rahmen von AviClim muss daher mit alternativen Annahmen hinsichtlich der Überwälzungsmöglichkeiten gearbeitet werden. Wie eingangs erwähnt, gehen wir prinzipiell davon aus, dass die Fluggesellschaften versuchen werden, die gesamte Kostenbelastung, die aus den klimapolitischen Instrumenten resultiert, an die Nachfrager weiterzugeben.

Im Folgenden werden drei mögliche Reaktionsweisen der Nachfrager nach Luftverkehrsdienstleistungen auf die Preiserhöhung der Fluggesellschaften alternativ angenommen:

1. Die Nachfrager akzeptieren die Preiserhöhung in vollem Umfang und fragen die gleichen Mengen an Luftverkehrsdienstleistungen nach wie vor der Einführung des jeweiligen klimapolitischen Instruments (vollständige Überwälzung, starre Reaktion der Nachfrage).
2. Die Nachfrager fragen nach der Preiserhöhung geringere Mengen an Luftverkehrsdienstleistungen nach als vor der Einführung der klimaschützenden Maßnahme. Der Mengenrückgang fällt aber *unterproportional* zur Preiserhöhung aus (teilweise Überwälzung, elastische Reaktion der Nachfrage). Folglich wird für den 2. Fall eine Preiselastizität von $-0,8$ angenommen.
3. Die Nachfrager fragen nach der Preiserhöhung geringere Mengen an Luftverkehrsdienstleistungen nach als vor der Einführung der klimaschützenden Maßnahme. Im hier angenommenen 3. Fall fällt der Mengenrückgang *überproportional* zur Preiserhöhung aus (teilweise Überwälzung, elastische Reaktion der Nachfrage). In diesem Fall wurde eine Preiselastizität von $-2,1$ angenommen.

Mithilfe dieser drei alternativen Betrachtungsweisen wird die gesamte Bandbreite möglicher Reaktionen der Nachfrager nach Luftverkehrsdienstleistungen auf Preiserhöhungen infolge klimaschützender Maßnahmen abgebildet. In der Realität wird der 2. Fall, also die teilweise Überwälzung der Kosten und ein unterproportionaler Mengenrückgang vermutlich der wahrscheinlichste Fall sein.

Entsprechend den Reaktionen der Nachfrager auf die Preiserhöhung werden die Fluggesellschaften ihr Angebot an Flügen verändern oder aber – im Fall einer starren Nachfrage – unverändert beibehalten. Wird das Flugangebot verändert, hat dies Einfluss auf die Verkehrsleistung, die Umsätze der Fluggesellschaften und die klimarelevanten Emissionen des Luftverkehrs. Die nachfol-

genden Tabellen zeigen die Veränderungen der Nachfrage und des Angebots an Luftverkehrsdienstleistungen differenziert nach klimapolitischen Instrumenten, Szenarien und den drei dargestellten Überwälzungsfällen. Hierbei wird implizit von einer Gleichheit von Angebot und Nachfrage nach Luftverkehrsdienstleistungen ausgegangen, was nach gewissen Anpassungsreaktionen und -zeiträumen auch realistisch erscheint. Da der Überwälzungsfall 1 von davon ausgeht, dass die Nachfrager die Preiserhöhung in vollem Umfang akzeptieren und die gleichen Mengen an Luftverkehrsdienstleistungen wie vor der Einführung des jeweiligen klimapolitischen Instruments nachfragen, verändert sich in diesem Fall die jeweilige Nachfrage in den drei Preisszenarien (Low Price Scenario, High Price Scenario und Mixed Price Scenario) nicht gegenüber der Business-as-usual-Entwicklung. Aufgrund dessen werden diese Ergebnisse in Form einer gemeinsamen Tabelle gezeigt.

Grundsätzlich ist bei allen nachfolgend dargestellten Ergebnissen zu berücksichtigen, dass die jeweils für die Business-as-usual-Entwicklung angegebene Nachfrage mit Hilfe empirischer Kennzahlen berechnet wurde. Mithin sind die Ergebnisse nur bedingt auf die Praxis übertragbar. Eine andere Vorgehensweise war jedoch aufgrund mangelnder Datenverfügbarkeit nicht möglich, weist jedoch den Vorteil auf, dass die Effekte in den Szenarien besonders gut miteinander vergleichbar sind.

Ausgangspunkt zur Modellierung der Nachfrage waren empirische Umsatzdaten im Weltluftverkehr. Diese wurde mit der Nachfrage in der Business-as-usual-Entwicklung im Szenario „World“ gleichgesetzt. Laut ICAO (2011) betrug der gesamte Umsatz des zivilen Weltluftverkehrs im Jahr 2010 579.300 Mio. USD. Diesem Umsatz standen 619.846 Mio. RTKs gegenüber (ICAO, 2011). Hieraus wurde die Kennziffer 0,93 USD Umsatz/RTK gebildet. Diese Kennziffer wurde sodann auf die modellierten Szenarien (Business-as-usual-Szenario und Reduktionsszenarien) übertragen und auf diese Weise die Umsätze in den Szenarien und Zieljahren quantitativ abgeschätzt. Hierbei ist zu berücksichtigen, dass die Umsätze im Jahr 2010 im modellierten Business-as-usual-Szenario niedriger sind als die von der ICAO genannten Daten. Dies liegt darin begründet, dass das von uns modellierte BAU-Szenario auf etwas niedrigeren RTKs basiert, wie in Kapitel 3 erläutert, da nicht der gesamte Weltluftverkehr, sondern nur die in OAG enthaltenen Flüge im Modell berücksichtigt werden konnten. Mithin unterscheiden sich die modellierten Umsätze des Weltluftverkehrs im Jahr 2010 um gut 179.300 Mio. USD von den Angaben der ICAO.

Implizit wurde von konstanten Yields (Umsatz/RTK) im gesamten Betrachtungszeitraum ausgegangen, was aus drei Gründen sachlich geboten erschien: Erstens erfolgen alle Berechnungen in

Preisen von 2012, mithin sind künftige inflationsbedingte Preiserhöhungen in den ausgewiesenen monetären Ergebnissen ausgeklammert. Gleiches gilt für die ebenfalls erwartbaren Veränderungen im Einkommensgefüge der Nachfrager nach Luftverkehrsdienstleistungen. Zweitens ist angesichts des bereits heute sehr hohen Wettbewerbsdrucks und der hohen Kostenbelastung der Fluggesellschaften im Betrachtungszeitraum nicht mit signifikanten Steigerungen des Yields zu rechnen. Drittens geht es bei den im Rahmen von AviClim untersuchten Nachfrageveränderungen nicht um möglichst genaue quantitative Vorhersagen, sondern ganz wesentlich um die relativen Veränderungen der Nachfrage durch die klimapolitischen Instrumente. Auf diese Weise können Aussagen darüber getroffen werden, wie sich die Effekte der einzelnen klimapolitischen Instrumente zueinander verhalten und welches der drei untersuchten Instrumente sich als vorteilhaft erweist.

Tabelle 5-16: Entwicklung der Nachfrage nach Luftverkehrsdienstleistungen, starre Preiselastizität; in Mrd. USD; Low Price Scenario, High Price Scenario sowie Mixed Price Scenario; identisch mit Business-as-usual Nachfrageentwicklung

	Scenario „Greater EU“, atr 20			Scenario „Greater EU“, atr 50			Scenario „Great Aviation Countries“, atr 20			Scenario „Great Aviation Countries“, atr 50		
Year	Climate Tax	Emissions Trading	NO _x -Charge	Climate Tax	Emissions Trading	NO _x -Charge	Climate Tax	Emissions Trading	NO _x -Charge	Climate Tax	Emissions Trading	NO _x -Charge
2010	204	204	204	204	204	204	517	517	517	517	517	517
2015	261	261	261	261	261	261	684	684	684	684	684	684
2020	329	329	329	329	329	329	879	879	879	879	879	879
2025	409	409	409	409	409	409	1105	1105	1105	1105	1105	1105
2030	508	508	508	508	508	508	1391	1391	1391	1391	1391	1391
	Scenario „Annex-I Countries“, atr 20			Scenario „Annex-I Countries; atr 50			Scenario „World“, atr 20			Scenario „World“, atr 50		
2010	501	501	501	501	501	501	560	560	560	560	560	560
2015	660	660	660	660	660	660	745	745	745	745	745	745
2020	846	846	846	846	846	846	960	960	960	960	960	960
2025	1062	1062	1062	1062	1062	1062	1209	1209	1209	1209	1209	1209
2030	1336	1336	1336	1336	1336	1336	1526	1526	1526	1526	1526	1526

Quelle: Eigene Berechnungen. In Preisen von 2012.

Tabelle 5-17: Entwicklung der Nachfrage nach Luftverkehrsdienstleistungen, Preiselastizität = -0,8; in Mrd. USD; Low Price Scenario

	Scenario „Greater EU“, atr 20			Scenario „Greater EU“, atr 50			Scenario „Great Aviation Countries“, atr 20			Scenario „Great Aviation Countries“, atr 50		
Year	Climate Tax	Emissions Trading	NO _x -Charge	Climate Tax	Emissions Trading	NO _x -Charge	Climate Tax	Emissions Trading	NO _x -Charge	Climate Tax	Emissions Trading	NO _x -Charge
2010	193	203	199	199	203	202	486	513	504	502	515	512
2015	240	255	250	251	258	257	624	664	657	655	674	673
2020	296	315	311	313	322	322	783	836	832	832	858	858
2025	362	387	383	386	398	398	969	1035	1037	1038	1070	1075
2030	445	474	473	477	491	492	1205	1284	1299	1299	1338	1348
	Scenario „Annex-I Countries“, atr 20			Scenario „Annex-I Countries; atr 50			Scenario „World“, atr 20			Scenario „World“, atr 50		
2010	471	496	488	486	498	496	527	555	546	544	558	555
2015	602	640	633	631	650	649	680	723	715	713	734	733
2020	753	805	801	801	826	827	855	912	909	909	937	938
2025	931	995	998	998	1029	1033	1060	1131	1136	1136	1171	1176
2030	1157	1234	1248	1248	1285	1295	1319	1405	1424	1424	1466	1479

Quelle: Eigene Berechnungen. In Preisen von 2012.

Tabelle 5-18: Entwicklung der Nachfrage nach Luftverkehrsdienstleistungen, Preiselastizität = -2,1; in Mrd. USD; Low Price Scenario

	Scenario „Greater EU“, atr 20			Scenario „Greater EU“, atr 50			Scenario „Great Aviation Countries“, atr 20			Scenario „Great Aviation Countries“, atr 50		
Year	Climate Tax	Emissions Trading	NO _x -Charge	Climate Tax	Emissions Trading	NO _x -Charge	Climate Tax	Emissions Trading	NO _x -Charge	Climate Tax	Emissions Trading	NO _x -Charge
2010	174	200	190	189	202	199	436	505	484	477	511	505
2015	205	244	233	234	253	249	528	632	613	608	658	654
2020	241	293	281	286	311	309	627	766	757	756	823	826
2025	286	350	340	348	380	379	748	921	928	930	1014	1026
2030	342	419	415	425	463	466	902	1110	1148	1150	1251	1279
	Scenario „Annex-I Countries“, atr 20			Scenario „Annex-I Countries; atr 50			Scenario „World“, atr 20			Scenario „World“, atr 50		
2010	421	489	468	462	495	488	472	547	524	517	554	547
2015	508	609	591	586	635	631	574	687	667	662	717	713
2020	603	738	729	727	793	795	684	835	827	825	899	902
2025	719	887	893	893	976	986	816	1005	1015	1016	1108	1123
2030	865	1067	1104	1104	1202	1229	984	1210	1258	1258	1369	1402

Quelle: Eigene Berechnungen. In Preisen von 2012.

Tabelle 5-19: Entwicklung der Nachfrage nach Luftverkehrsdienstleistungen, Preiselastizität = -0,8; in Mrd. USD; High Price Scenario

	Scenario „Greater EU“, atr 20			Scenario „Greater EU“, atr 50			Scenario „Great Aviation Countries“, atr 20			Scenario „Great Aviation Countries“, atr 50		
Year	Climate Tax	Emissions Trading	NO _x -Charge	Climate Tax	Emissions Trading	NO _x -Charge	Climate Tax	Emissions Trading	NO _x -Charge	Climate Tax	Emissions Trading	NO _x -Charge
2010	193	203	199	199	203	202	486	513	504	502	515	512
2015	226	250	243	244	256	254	585	651	639	635	668	665
2020	262	301	293	296	316	314	687	793	786	785	836	838
2025	296	355	346	353	382	381	779	937	943	945	1022	1032
2030	339	418	414	424	463	465	894	1105	1144	1146	1249	1277
	Scenario „Annex-I Countries“, atr 20			Scenario „Annex-I Countries; atr 50			Scenario „World“, atr 20			Scenario „World“, atr 50		
2010	471	496	488	486	498	496	527	555	546	544	558	555
2015	564	628	616	613	644	642	637	708	696	692	727	725
2020	661	764	757	755	805	807	750	864	858	857	913	916
2025	748	902	907	908	983	993	850	1022	1032	1033	1117	1130
2030	858	1063	1100	1100	1200	1228	975	1205	1254	1254	1366	1400

Quelle: Eigene Berechnungen. In Preisen von 2012.

Tabelle 5-20: Entwicklung der Nachfrage nach Luftverkehrsdienstleistungen, Preiselastizität = -2;1 in Mrd. USD; High Price Scenario

	Scenario „Greater EU“, atr 20			Scenario „Greater EU“, atr 50			Scenario „Great Aviation Countries“, atr 20			Scenario „Great Aviation Countries“, atr 50		
Year	Climate Tax	Emissions Trading	NO _x -Charge	Climate Tax	Emissions Trading	NO _x -Charge	Climate Tax	Emissions Trading	NO _x -Charge	Climate Tax	Emissions Trading	NO _x -Charge
2010	174	200	190	189	202	199	436	505	484	477	511	505
2015	168	232	213	215	247	242	424	597	565	557	641	635
2020	153	256	233	243	293	288	376	653	635	633	768	773
2025	112	267	244	263	339	336	250	665	680	685	888	915
2030	64	270	261	288	389	395	87	641	743	748	1019	1093
	Scenario „Annex-I Countries“, atr 20			Scenario „Annex-I Countries; atr 50			Scenario „World“, atr 20			Scenario „World“, atr 50		
2010	421	489	468	462	495	488	472	547	524	517	554	547
2015	408	576	545	536	619	612	461	649	615	606	698	691
2020	360	630	612	608	740	744	408	709	693	690	837	844
2025	237	642	655	657	854	880	266	718	744	746	967	1001
2030	80	619	716	716	980	1051	82	684	813	813	1108	1197

Quelle: Eigene Berechnungen. In Preisen von 2012.

Tabelle 5-21: Entwicklung der Nachfrage nach Luftverkehrsdienstleistungen, Preiselastizität = -0,8; in Mrd. USD; Mixed Price Scenario

	Scenario „Greater EU“, atr 20			Scenario „Greater EU“, atr 50			Scenario „Great Aviation Countries“, atr 20			Scenario „Great Aviation Countries“, atr 50		
Year	Climate Tax	Emissions Trading	NO _x -Charge	Climate Tax	Emissions Trading	NO _x -Charge	Climate Tax	Emissions Trading	NO _x -Charge	Climate Tax	Emissions Trading	NO _x -Charge
2010	193	203	199	199	203	202	486	513	504	502	515	512
2015	226	255	244	244	258	254	585	664	640	635	674	667
2020	262	315	295	296	322	316	687	836	792	785	858	844
2025	296	387	351	353	398	386	779	1035	957	945	1070	1046
2030	339	474	423	424	491	474	894	1284	1170	1146	1338	1304
	Scenario „Annex-I Countries“, atr 20			Scenario „Annex-I Countries; atr 50			Scenario „World“, atr 20			Scenario „World“, atr 50		
2010	471	496	488	486	498	496	527	555	546	544	558	555
2015	564	640	618	613	650	643	637	723	698	692	734	727
2020	661	805	762	755	826	813	750	912	865	857	937	923
2025	748	995	921	908	1029	1006	850	1131	1048	1033	1171	1146
2030	858	1234	1125	1100	1285	1253	975	1405	1283	1254	1466	1430

Quelle: Eigene Berechnungen. In Preisen von 2012.

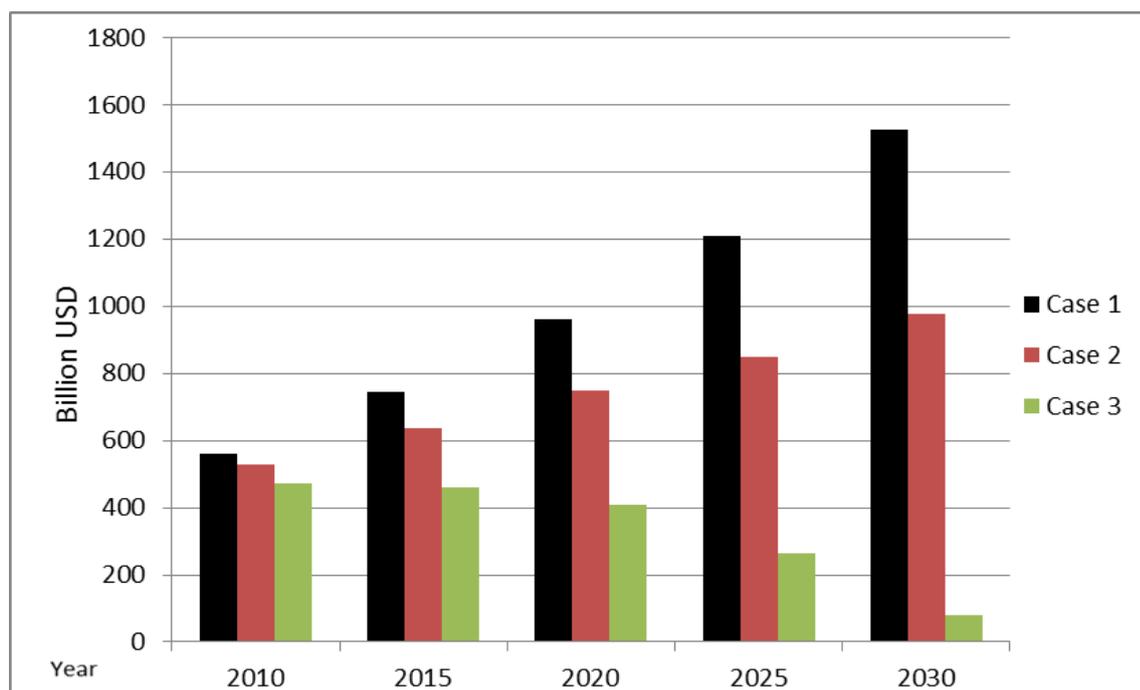
Tabelle 5-22: Entwicklung der Nachfrage nach Luftverkehrsdienstleistungen, Preiselastizität = -2;1 in Mrd. USD; Mixed Price Scenario

	Scenario „Greater EU“, atr 20			Scenario „Greater EU“, atr 50			Scenario „Great Aviation Countries“, atr 20			Scenario „Great Aviation Countries“, atr 50		
Year	Climate Tax	Emissions Trading	NO _x -Charge	Climate Tax	Emissions Trading	NO _x -Charge	Climate Tax	Emissions Trading	NO _x -Charge	Climate Tax	Emissions Trading	NO _x -Charge
2010	174	200	190	189	202	199	436	505	484	477	511	505
2015	168	244	215	215	253	243	424	632	570	557	658	640
2020	153	293	239	243	311	294	376	766	651	633	823	789
2025	112	350	257	263	380	349	250	921	717	685	1014	952
2030	64	419	284	288	463	419	87	1110	812	748	1251	1161
	Scenario „Annex-I Countries“, atr 20			Scenario „Annex-I Countries; atr 50			Scenario „World“, atr 20			Scenario „World“, atr 50		
2010	421	489	468	462	495	488	472	547	524	517	554	547
2015	408	609	550	536	635	617	461	687	621	606	717	697
2020	360	738	627	608	793	760	408	835	711	690	899	862
2025	237	887	691	657	976	916	266	1005	785	746	1108	1043
2030	80	1067	782	716	1202	1117	82	1210	890	813	1369	1274

Quelle: Eigene Berechnungen. In Preisen von 2012.

Wie aus den Tabellen ersichtlich, verändert sich die Nachfrage z. T. deutlich infolge der Einführung der klimapolitischen Instrumente. Wieder löst das Instrument der Climate Tax die quantitativ größten Veränderungen aus. Dies gilt insbesondere für das High Price Szenario und den Überwälzungsfall 3, bei dem von einer Preiselastizität von -2,1 ausgegangen wurde. Für das Szenario „World“ im Jahr 2030 wurde für die Metrik atr 20 ein Rückgang der Nachfrage von 1.526 Mrd. USD in der Business-as-usual-Entwicklung auf 82 Mrd. USD errechnet. Dieser Rückgang entspricht einer Nachfrageverringering um knapp 95 Prozentpunkte. Offenbar wirken hier die überproportionale Nachfragerreaktion mit dem in diesem Preisszenario und Jahr sehr hohen Preis pro CO₂-Äquivalent in besonders ungünstiger Weise zusammen. Damit hat die Climate Tax zu diesem Zeitpunkt bei einer entsprechenden Reaktion der Nachfrager nahezu prohibitive Effekte. Dies veranschaulicht die nachfolgende Abbildung.

Abbildung 5-6: Veränderung der Nachfrage nach Luftverkehrsdienstleistungen durch die Klima-
steuer im Szenario „World“, atr 20, High Price Szenario, differenziert nach Überwälzungsfällen
1-3 (Fall 1 ist identisch mit Business-as-usual-Entwicklung)



Quelle: Eigene Berechnungen. In Preisen von 2012.

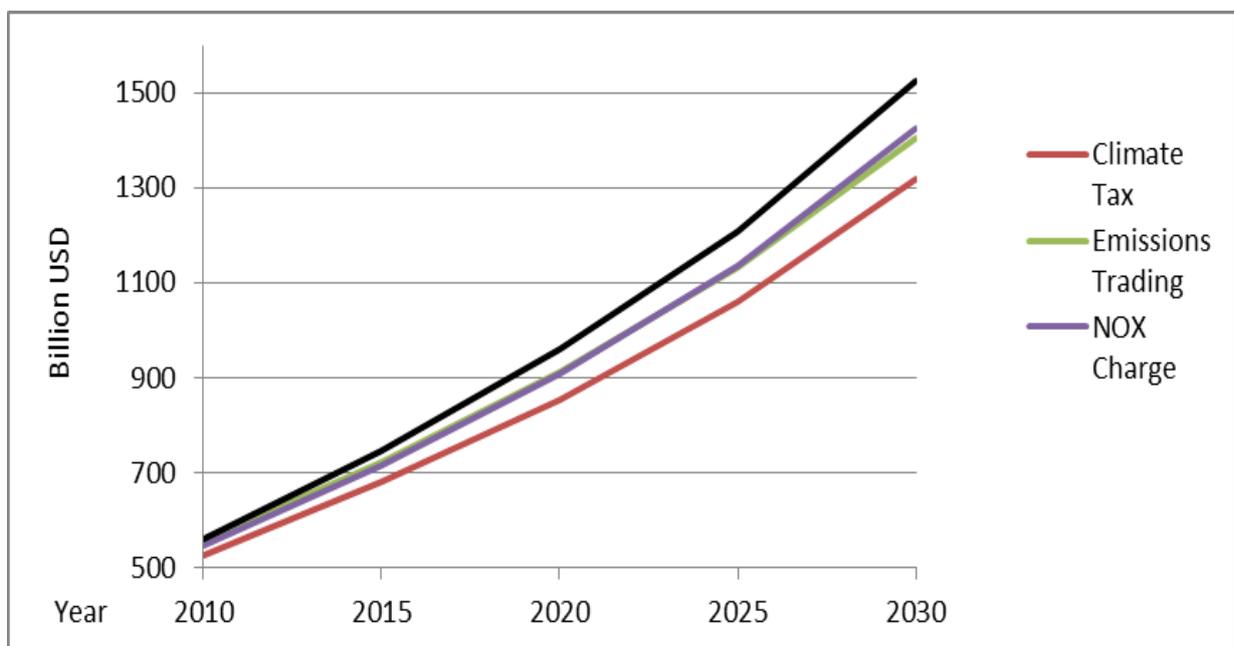
Anders verhält es sich in allen drei Preisszenarien bei einer moderaten Reaktion der Nachfrager auf die durch die klimapolitischen Instrumente ausgelösten Preiserhöhungen auf Luftverkehrsdienstleistungen. Unterstellt man eine Preiselastizität von -0,8 (Überwälzungsfall 2), befinden sich die Nachfragerückgänge gegenüber der Business-as-usual-Entwicklung zumeist auf relativ moderatem Niveau. Dies gilt für alle untersuchten klimapolitischen Instrumente, wobei das In-

strument Climate Tax nach wie vor die größten Effekte auslöst und die Effekte der übrigen beiden klimapolitischen Instrumente im Low Price Scenario und im High Price Scenario in einer ähnlichen Größenordnung liegen.

Im Mixed Price Scenario zeigen sich erwartungsgemäß wieder größere Unterschiede zwischen den Nachfrageeffekten beim Emissionshandel und den anderen beiden klimapolitischen Instrumenten. Hier verursacht der Emissionshandel zu jedem Zeitpunkt des Betrachtungszeitraums die im Instrumentenvergleich geringsten Nachfragerückgänge gegenüber der Business-as-usual-Entwicklung. Die Instrumente NO_x-Charge und Climate Tax führen stets zu größeren Nachfragereduktionen, die sich jedoch im Fall einer Preiselastizität der Nachfrage von -0,8 (Fall 2) ebenfalls auf einem moderaten Niveau befinden.

Auch nach der Einführung der klimapolitischen Instrumente ist mit im Zeitverlauf steigenden Umsätzen der Fluggesellschaften zu rechnen. Dies gilt im Low Price Scenario für alle drei untersuchten klimapolitischen Instrumente. Die nachfolgende Abbildung zeigt beispielhaft die Nachfrageentwicklung für das Szenario „World“, atr 20, Low Price Scenario im Überwälzungsfall 2 im Vergleich zur Business-as-usual-Entwicklung.

Abbildung 5-7: Entwicklung der Nachfrage nach Luftverkehrsdienstleistungen in Szenario „World“, atr 20, Low Price Scenario, Überwälzungsfall 2; in Mrd. USD



Quelle: Eigene Berechnungen. In Preisen von 2012.

Wie sich die Verkehrsleistung aufgrund der dargestellten Nachfrageeffekte verändert, wird im folgenden Kapitel untersucht.

6 Modellierungsergebnisse: Effekte der klimapolitischen Maßnahmen auf die Verkehrsleistung, die klimarelevanten Emissionen und die Klimawirkung

6.1 Effekte der klimapolitischen Maßnahmen auf die Verkehrsleistung

Die Fluggesellschaften werden entsprechend den zuvor dargestellten Nachfragereaktionen ihr Angebot an Flügen verändern oder aber – im Fall einer unelastischen Nachfrage – unverändert beibehalten. Wird das Flugangebot verändert, hat dies Einfluss auf die Verkehrsleistung. Die nachfolgenden Tabellen zeigen exemplarisch die Entwicklung der Verkehrsleistung im Business-as-usual-Szenario und deren Veränderung im Low Price Szenario differenziert nach klimapolitischen Instrumenten, geopolitischen Szenarien und den drei dargestellten Überwälzungsfällen im Vergleich zur Business-as-usual-Entwicklung. Die Ergebnistabellen für die übrigen beiden Preisszenarien finden sich im Anhang.

Tabelle 6-1: Entwicklung der Verkehrsleistung, starre Preiselastizität; in Mrd. RTKs; Low Price Scenario, High Price Scenario und Mixed Price Scenario;
identisch mit Business-as-usual Entwicklung

	Scenario „Greater EU“, atr 20			Scenario „Greater EU“, atr 50			Scenario „Great Aviation Countries“, atr 20			Scenario „Great Aviation Countries“, atr 50		
Year	Climate Tax	Emissions Trading	NO _x -Charge	Climate Tax	Emissions Trading	NO _x -Charge	Climate Tax	Emissions Trading	NO _x -Charge	Climate Tax	Emissions Trading	NO _x -Charge
2010	220	220	220	220	220	220	556	556	556	556	556	556
2015	281	281	281	281	281	281	735	735	735	735	735	735
2020	354	354	354	354	354	354	945	945	945	945	945	945
2025	440	440	440	440	440	440	1188	1188	1188	1188	1188	1188
2030	546	546	546	546	546	546	1496	1496	1496	1496	1496	1496
	Scenario „Annex-I Countries“, atr 20			Scenario „Annex-I Countries; atr 50			Scenario „World“, atr 20			Scenario „World“, atr 50		
2010	538	538	538	538	538	538	603	603	603	603	603	603
2015	709	709	709	709	709	709	801	801	801	801	801	801
2020	910	910	910	910	910	910	1032	1032	1032	1032	1032	1032
2025	1142	1142	1142	1142	1142	1142	1301	1301	1301	1301	1301	1301
2030	1437	1437	1437	1437	1437	1437	1640	1640	1640	1640	1640	1640

Quelle: Eigene Berechnungen. In Preisen von 2012.

Tabelle 6-2: Entwicklung der Verkehrsleistung, Preiselastizität = -0,8; in Mrd. RTKs; Low Price Szenario

	Scenario „Greater EU“, atr 20			Scenario „Greater EU“, atr 50			Scenario „Great Aviation Countries“, atr 20			Scenario „Great Aviation Countries“, atr 50		
Year	Climate Tax	Emissions Trading	NO _x -Charge	Climate Tax	Emissions Trading	NO _x -Charge	Climate Tax	Emissions Trading	NO _x -Charge	Climate Tax	Emissions Trading	NO _x -Charge
2010	207	218	214	214	219	217	523	551	542	540	554	551
2015	258	274	269	270	278	276	671	714	706	704	725	723
2020	318	339	335	336	347	346	842	898	895	894	922	923
2025	389	416	412	415	428	427	1042	1113	1115	1116	1151	1155
2030	478	510	508	513	528	529	1296	1381	1396	1397	1439	1450
	Scenario „Annex-I Countries“, atr 20			Scenario „Annex-I Countries; atr 50			Scenario „World“, atr 20			Scenario „World“, atr 50		
2010	506	534	525	523	536	533	566	597	588	585	600	597
2015	647	689	681	679	699	698	731	777	769	767	790	788
2020	810	865	862	861	888	889	919	981	978	977	1007	1009
2025	1001	1070	1073	1073	1107	1111	1139	1217	1221	1221	1259	1265
2030	1244	1327	1342	1341	1382	1393	1419	1511	1531	1531	1576	1590

Quelle: Eigene Berechnungen. In Preisen von 2012.

Tabelle 6-3: Entwicklung der Verkehrsleistung, Preiselastizität = -2,1; in Mrd. RTKs; Low Price Szenario

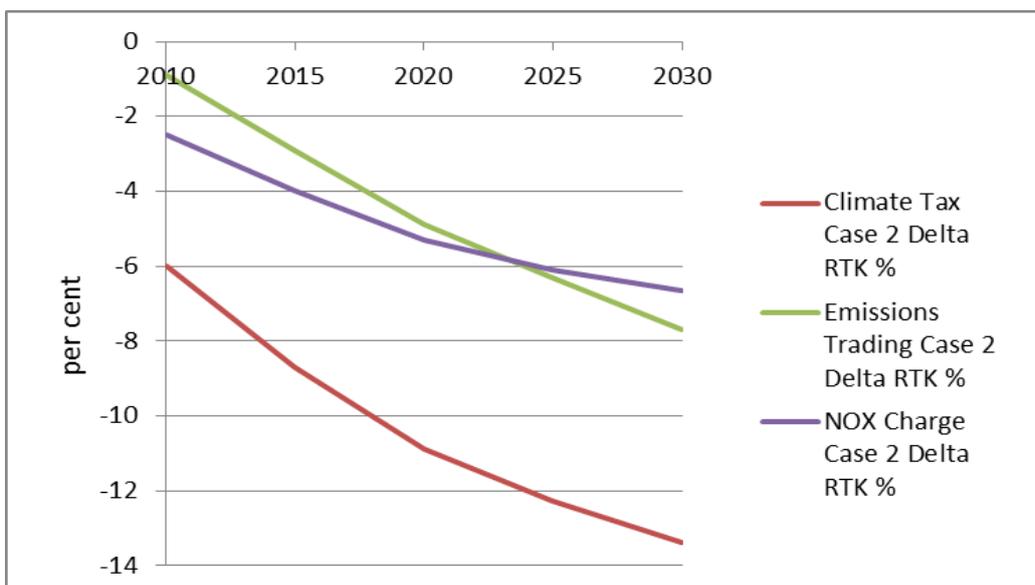
	Scenario „Greater EU“, atr 20			Scenario „Greater EU“, atr 50			Scenario „Great Aviation Countries“, atr 20			Scenario „Great Aviation Countries“, atr 50		
Year	Climate Tax	Emissions Trading	NO _x -Charge	Climate Tax	Emissions Trading	NO _x -Charge	Climate Tax	Emissions Trading	NO _x -Charge	Climate Tax	Emissions Trading	NO _x -Charge
2010	187	215	205	204	217	214	469	543	520	513	550	543
2015	221	262	250	251	272	268	568	679	659	653	708	704
2020	259	315	303	308	335	332	674	823	814	812	885	888
2025	307	376	366	374	408	407	805	991	998	1000	1091	1103
2030	367	450	447	458	498	501	970	1193	1234	1236	1346	1376
	Scenario „Annex-I Countries“, atr 20			Scenario „Annex-I Countries; atr 50			Scenario „World“, atr 20			Scenario „World“, atr 50		
2010	453	526	503	497	532	525	507	588	563	556	596	588
2015	547	655	635	630	683	679	618	739	717	711	771	767
2020	648	793	784	782	853	855	735	897	889	887	966	970
2025	773	954	960	961	1049	1061	878	1080	1092	1093	1192	1207
2030	930	1148	1187	1187	1293	1322	1058	1301	1353	1353	1472	1508

Quelle: Eigene Berechnungen. In Preisen von 2012.

Wie aus den Tabellen ersichtlich, verändert sich das Flugangebot teilweise merklich infolge der Einführung der klimapolitischen Instrumente. Hierbei ist zu berücksichtigen, dass sich die Flugpläne annahmegemäß jeweils hinsichtlich der Flüge von, nach und innerhalb der jeweils unter das geopolitische Szenario fallenden Ländergruppen verändern, die übrigen Flüge aber hiervon unbeeinflusst bleiben. Dies kann damit begründet werden, dass die übrigen Flüge nicht von den jeweiligen klimapolitischen Instrumenten betroffen sind.

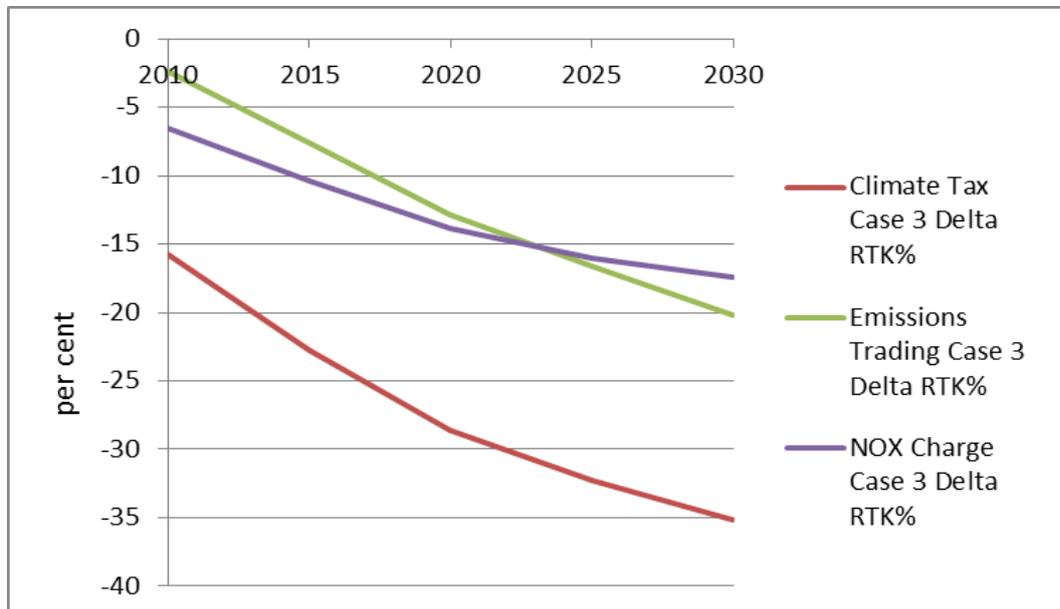
Da von einer Gleichheit von Nachfrage und Angebot ausgegangen wurde, spiegeln die veränderten Flugpläne, also das mengenmäßige Angebot der Fluggesellschaften, die veränderte Nachfragesituation direkt wider. Vor diesem Hintergrund ist mit den prinzipiell gleichen Effekten wie bei den bereits im vorangegangenen Kapitel Beschriebenen zu rechnen. Auch hier zeigen sich die größten Effekte im High Price Szenario bei einer weltweiten Einführung der jeweiligen klimapolitischen Instrumente, wobei die für die Climate Tax berechneten Effekte mit Abstand am größten ausfallen. Dies gilt ganz besonders für den Überwälzungsfall 3, bei dem ein überproportionaler Nachfragerückgang angenommen wurde. Hingegen fallen die Veränderungen der angebotenen RTKs im Low Price Szenario speziell im Überwälzungsfall 2 durchweg moderat aus. Dies veranschaulichen die nachfolgenden beiden Abbildungen, die die Veränderung der Verkehrsleistung im Szenario „Great Aviation Countries“ im Low Price Szenario, Metrik atr 20, für die Überwälzungsfälle 2 und 3 prozentual ggü. der Business-as-usual-Entwicklung zeigen.

Abbildung 6-1: Veränderung der Verkehrsleistung (RTKs) in Szenario „Great Aviation Countries“, atr 20, Low Price Szenario, Überwälzungsfall 2, in Prozent ggü. Business-as-usual-Entwicklung



Quelle: Eigene Berechnungen.

Abbildung 6-2: Veränderung der Verkehrsleistung (RTKs) in Szenario „Great Aviation Countries“, atr 20, Low Price Scenario, Überwälzungsfall 3, in Prozent ggü. Business-as-usual-Entwicklung



Quelle: Eigene Berechnungen.

Im Mixed Price Szenario zeigen sich wieder die größten Unterschiede zwischen den drei betrachteten klimapolitischen Instrumenten: Wie die Tabellen im Anhang zeigen, verzeichnet auch die Verkehrsleistung beim Instrument des Emissionshandels auf alle klimarelevanten Gase im Vergleich zur Business-as-usual-Entwicklung die geringsten Rückgänge. An mittlerer Stelle folgt die Veränderung der Verkehrsleistung durch die NO_x-Charge. Die Climate Tax verursacht die größten prozentualen und absoluten Verringerungen der Verkehrsleistung. Diese Reihenfolge gilt für alle untersuchten geopolitischen Szenarien und Preisüberwälzungsfälle.

6.2 Effekte der klimapolitischen Maßnahmen auf die klimarelevanten Emissionen und die Klimawirkung des Luftverkehrs

6.2.1 Methodik

6.2.1.1 Reduzierung der Emissionen

Die verminderte Gesamtverkehrsleistung (siehe Kapitel 6.1) wird nun auf das Emissionskataster übertragen. Dazu wird vereinfachend angenommen, dass sich für alle betroffenen Verbindungen die Frequenz in gleichem Maße vermindert, wie die Gesamtverkehrsleistung:

$$F_{neu} = F_{alt} * \frac{RTK_{neu}}{RTK_{alt}}$$

Die Katasterwerte (Fuel, NO_x und zurückgelegte Distanz) verhalten sich nun proportional zur Frequenzanpassung, dies erlaubt auch eine direkte Anpassung der Emissionen:

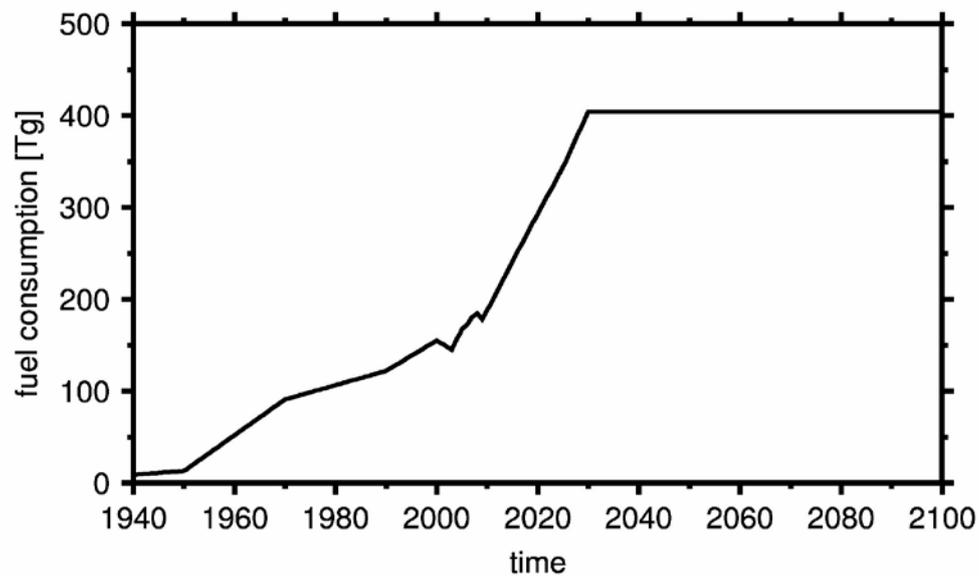
$$E_{neu} = E_{alt} * \frac{RTK_{neu}}{RTK_{alt}}$$

Zusätzlich müssen die Emissionen noch von Septemberwerten aufs Jahr hochgerechnet werden. Hierzu werden für Emissionen von Flügen, die szenariobedingt von der Maßnahme betroffen sind und Emissionen von Flügen, die nicht betroffen sind, unterschiedliche Faktoren verwendet (siehe hierzu den Anhang dieses Berichts).

6.2.1.2 Berechnung der Temperaturänderung

Anhand der geänderten Emissionskataster wurde die Klimawirkung mit Hilfe von AirClim berechnet. Dazu wurde ein Emissionsverlauf angenommen, der bis 2010 dem tatsächlichen Verlauf des globalen Treibstoffverbrauchs folgt (Lee et al, 2009) aber auf die Gesamtemission des hier verwendeten Emissionskatasters skaliert ist. Zwischen 2010 und 2030 wurden die Emissionen aus Schaefer (2012) verwendet. Da für die Zeit nach 2030 zu wenige Informationen über die Entwicklung des Luftverkehrs vorliegen und deshalb nur spekuliert werden kann, wie er sich entwickelt, wird hier angenommen, dass die Emissionen nach 2030 konstant verlaufen (siehe Abbildung 6-3).

Abbildung 6-3: Zeitliche Entwicklung des globalen Treibstoffverbrauchs des Luftverkehrs



Quelle: Eigene Darstellung.

Mit Hilfe der veränderten Emissionskataster und des hier dargestellten Emissionsverlaufs wurde der zeitliche Verlauf der Temperaturänderung, verursacht durch die verschiedenen Spezies mit Hilfe des Modells AirClim berechnet. Neben dem Temperaturverlauf wurde auch das ATR50 für alle Szenarien berechnet. Außerdem wurde mit Hilfe einer Monte-Carlo-Simulation die Unsicherheit der relativen Änderung der Klimawirkung zwischen einem Szenario mit klimapolitischer Maßnahme und der Business-as-usual-Entwicklung berechnet. Dadurch kann trotz bestehender Unsicherheiten bei der Berechnung der Klimawirkung des Luftverkehrs sichergestellt werden, dass das klimapolitische Instrument eine signifikante Verringerung der Klimawirkung verursacht.

6.2.1.3 Berechnung der Klimawirkung des CO₂-Zukaufs aus anderen Sektoren

Für die politischen Instrumente, die einen Zukauf von Emissionszertifikaten erlauben, muss die zusätzliche Verringerung der Klimawirkung mit AirClim separat berechnet werden. Hier zeigen sich methodische Unterschiede zu den bereits dargestellten ökonomischen und verkehrlichen Ergebnissen, bei denen der Zukauf von Emissionsrechten stets direkt berücksichtigt wurde. Zur Modellierung der Klimawirkung des Zukaufs an Emissionsrechten wird die Klimawirkung der entsprechenden CO₂-Emission mit AirClim berechnet und anschließend von der Klimawirkung der entsprechenden Szenarien abgezogen. Systembedingt kann dies allerdings nicht bei der Berechnung der Monte-Carlo-Simulation berücksichtigt werden, weshalb die Abbildungen der

Ergebnisse der Monte-Carlo-Simulation auf die Szenarien ohne Zukaufmöglichkeiten beschränkt bleiben müssen.

6.2.2 Ergebnisse

6.2.2.1 CO₂-Äquivalente

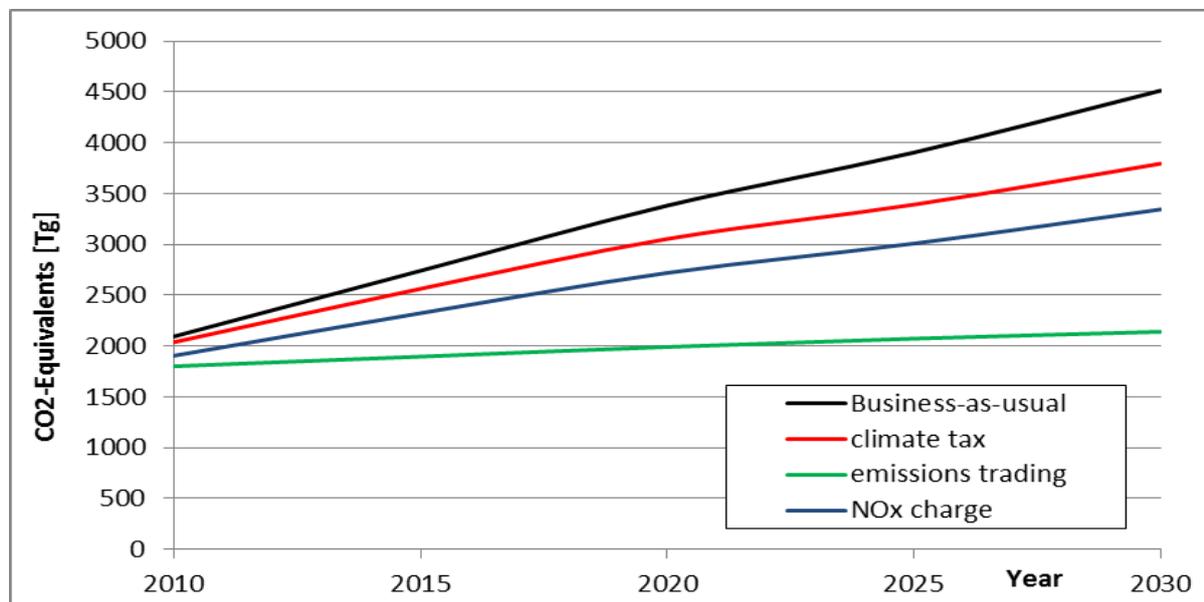
Tabelle 6-4: Reduzierung der CO₂-Äquivalente für ausgewählte Varianten (Metrik atr 50, Case 2)

emissions trading		Szenario Greater EU						Scenario Great Aviation Countries						Scenario World							
High Price	CO ₂	Cont	H ₂ O	NO _x	Sum	Pur- chase	With pur- chase	CO ₂	Cont	H ₂ O	NO _x	Sum	Pur- chase	With pur- chase	CO ₂	Cont	H ₂ O	NO _x	Sum	Pur- chase	With pur- chase
2010	588	814	75	607	2085	106	1979	587	815	76	607	2085	284	1800	587	815	76	607	2084	310	1774
2015	751	1044	103	818	2715	273	2443	741	1030	101	808	2681	810	1872	739	1028	101	807	2674	897	1778
2020	908	1277	128	1016	3329	432	2898	881	1240	125	989	3234	1317	1917	876	1233	124	984	3216	1465	1751
2025	1038	1477	150	1151	3815	560	3255	989	1408	143	1100	3640	1722	1918	979	1394	142	1091	3606	1925	1681
2030	1195	1728	176	1279	4378	710	3667	1118	1615	165	1200	4098	2217	1880	1102	1592	163	1186	4043	2487	1556
Low Price	CO ₂	Cont	H ₂ O	NO _x	Sum	Pur- chase	With pur- chase	CO ₂	Cont	H ₂ O	NO _x	Sum	Pur- chase	With pur- chase	CO ₂	Cont	H ₂ O	NO _x	Sum	Pur- chase	With pur- chase
2010	588	814	75	607	2085	106	1979	587	815	76	607	2085	284	1800	587	815	76	607	2084	310	1774
2015	754	1046	103	821	2724	273	2451	747	1039	102	816	2705	810	1895	746	1038	102	815	2701	897	1804
2020	915	1285	129	1024	3353	432	2922	901	1268	128	1011	3308	1317	1991	898	1264	127	1009	3299	1465	1834
2025	1051	1495	152	1168	3865	560	3305	1031	1467	149	1147	3794	1722	2073	1026	1461	149	1144	3780	1925	1855
2030	1218	1758	179	1306	4461	710	3751	1188	1717	176	1277	4358	2217	2140	1182	1708	175	1272	4337	2487	1850
climate tax		Szenario Greater EU						Scenario Great Aviation Countries						Scenario World							
High Price	CO ₂	Cont	H ₂ O	NO _x	Sum	Pur- chase	With pur- chase	CO ₂	Cont	H ₂ O	NO _x	Sum	Pur- chase	With pur- chase	CO ₂	Cont	H ₂ O	NO _x	Sum	Pur- chase	With pur- chase
2010	583	808	75	601	2067	0	2067	574	796	74	593	2037	0	2037	572	794	74	592	2032	0	2032
2015	739	1028	101	803	2671	0	2671	709	985	97	772	2563	0	2563	703	978	96	768	2545	0	2545
2020	890	1253	125	993	3261	0	3261	832	1171	118	932	3054	0	3054	822	1157	116	923	3019	0	3019
2025	1013	1443	146	1119	3721	0	3721	922	1313	133	1024	3392	0	3392	905	1289	131	1009	3335	0	3335
2030	1165	1686	171	1242	4264	0	4264	1036	1497	153	1109	3795	0	3795	1011	1461	150	1088	3711	0	3711
Low Price	CO ₂	Cont	H ₂ O	NO _x	Sum	Pur- chase	With pur- chase	CO ₂	Cont	H ₂ O	NO _x	Sum	Pur- chase	With pur- chase	CO ₂	Cont	H ₂ O	NO _x	Sum	Pur- chase	With pur- chase
2010	583	808	75	601	2067	0	2067	574	796	74	593	2037	0	2037	572	794	74	592	2032	0	2032
2015	746	1037	102	812	2697	0	2697	728	1012	100	794	2634	0	2634	725	1008	99	791	2623	0	2623
2020	906	1273	128	1013	3320	0	3320	877	1233	124	983	3218	0	3218	871	1226	123	979	3200	0	3200
2025	1041	1481	150	1155	3826	0	3826	1003	1427	145	1116	3691	0	3691	996	1417	145	1110	3667	0	3667
2030	1206	1743	177	1292	4419	0	4419	1157	1672	171	1243	4244	0	4244	1148	1659	170	1236	4213	0	4213
NO _x charge		Szenario Greater EU						Scenario Great Aviation Countries						Scenario World							
High Price	CO ₂	Cont	H ₂ O	NO _x	Sum	Pur- chase	With pur- chase	CO ₂	Cont	H ₂ O	NO _x	Sum	Pur- chase	With pur- chase	CO ₂	Cont	H ₂ O	NO _x	Sum	Pur- chase	With pur- chase
2010	589	799	69	587	2044	32	2013	589	772	61	563	1985	81	1904	589	767	60	559	1976	89	1886
2015	752	1024	95	791	2662	84	2578	745	979	83	749	2555	232	2323	743	971	81	743	2538	259	2279
2020	909	1256	119	984	3268	132	3135	890	1185	103	920	3098	379	2719	887	1173	100	911	3071	424	2647
2025	1040	1455	139	1117	3751	175	3575	1006	1356	119	1031	3512	503	3009	1000	1338	116	1018	3472	565	2908
2030	1201	1707	164	1246	4318	225	4093	1150	1573	139	1137	3999	654	3344	1140	1549	135	1121	3944	736	3208
Low Price	CO ₂	Cont	H ₂ O	NO _x	Sum	Pur- chase	With pur- chase	CO ₂	Cont	H ₂ O	NO _x	Sum	Pur- chase	With pur- chase	CO ₂	Cont	H ₂ O	NO _x	Sum	Pur- chase	With pur- chase
2010	589	799	69	587	2044	32	2013	589	772	61	563	1985	81	1904	589	767	60	559	1976	89	1886
2015	755	1028	95	794	2673	84	2589	752	989	84	757	2581	232	2349	752	982	82	751	2566	259	2308
2020	917	1265	120	993	3294	132	3162	909	1211	105	940	3165	379	2786	908	1202	103	933	3145	424	2721
2025	1054	1472	141	1133	3801	175	3625	1043	1405	123	1069	3641	503	3137	1041	1393	121	1060	3615	565	3050
2030	1222	1734	167	1269	4393	225	4168	1207	1650	146	1194	4197	654	3543	1203	1635	142	1183	4164	736	3428

Quelle: Eigene Berechnungen.

Tabelle 6-4 zeigt die akkumulierten CO₂-Äquivalente unter Annahme verschiedener klimapolitischer Maßnahmen und geopolitischer Szenarien. Im Gegensatz zur Darstellung in Kapitel 5.1 werden für jedes Szenario immer die weltweiten Emissionen aufgeführt und nicht nur die Emissionen im unmittelbaren geopolitischen Wirkungsbereich. Für die Instrumente Emissionshandel für alle klimarelevanten Gase und NO_x-Entgelte, das annahmegemäß mit einem CO₂-Emissionshandel kombiniert wird, werden dabei auch die zugekauften Emissionsrechte berücksichtigt.

Abbildung 6-4: Klimawirkung in CO₂-Äquivalenten [Tg] für verschiedene klimapolitische Maßnahmen unter Annahme des geopolitischen Szenarios „Great Aviation Countries“ und „Mixed Price Scenario“ unter Berücksichtigung von Emissionseinsparungen durch Zukäufe aus anderen Sektoren



Quelle: Eigene Berechnungen.

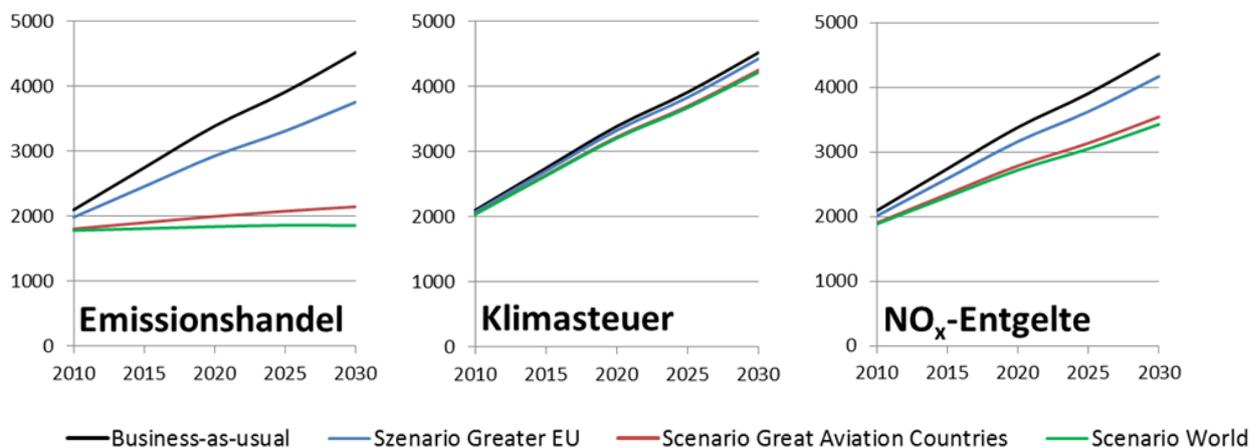
Abbildung 6-4 zeigt die Verminderung der Klimawirkung der Instrumente gegenüber der Business-as-usual-Entwicklung für das Mixed Price Szenario kombiniert mit dem geopolitischen Szenario „Great Aviation Countries“. Hier wird deutlich, dass der Emissionshandel auf alle klimarelevanten Gase das im Hinblick auf die Klimawirkung mit Abstand günstigste Instrument ist, wenn die Emissionsrechtszukäufe des Luftverkehrs aus anderen Sektoren berücksichtigt werden.

Die Zurechnung der Zukäufe zu den Einsparungen an klimarelevanten Emissionen des Luftverkehrs ist dann sachlich geboten, wenn die Nachfrage des Luftverkehrssektors nach Emissionsrechten zu zusätzlichen Reduktionsmaßnahmen und damit zu einem zusätzlichen Angebot an diesen Rechten bei anderen Teilnehmern am Emissionshandel führt. Mit Blick auf die sehr hohen

Grenzvermeidungskosten des Luftverkehrssektors für klimarelevante Emissionen spricht vieles dafür, dass der Luftverkehrssektor höhere Preise für Emissionsrechte zu zahlen bereit sein wird als andere Emittentengruppen. Aufgrund dessen erscheint es plausibel, dass die Zukäufe des Luftverkehrssektors an Emissionsrechten zu zusätzlichen Emissionseinsparungen bei anderen Emittenten führen werden. Mithin ist die Zuordnung der durch die Zukäufe an Emissionsrechten erfolgten Veränderung der Klimawirkung zum Luftverkehr gerechtfertigt.

Ein Vergleich der Klimawirkung von verschiedenen geopolitischen Szenarien (siehe Abbildung 6-5) zeigt erwartungsgemäß, dass klimapolitische Maßnahmen, die nur in den Staaten des „Greater EU“-Szenarios eingeführt werden, mit Abstand am wenigsten effektiv hinsichtlich der Klimawirkung sind. Hingegen unterscheidet sich das geopolitische Szenario „Great Aviation Countries“ kaum in seiner Wirksamkeit gegenüber einer weltweiten Einführung der Maßnahme.

Abbildung 6-5: Vergleich der geopolitischen Szenarien „Greater EU“, „Great Aviation Countries“ und „World“ in Bezug auf ihre Klimawirkung für die jeweilige Maßnahme (Low Price Scenario)

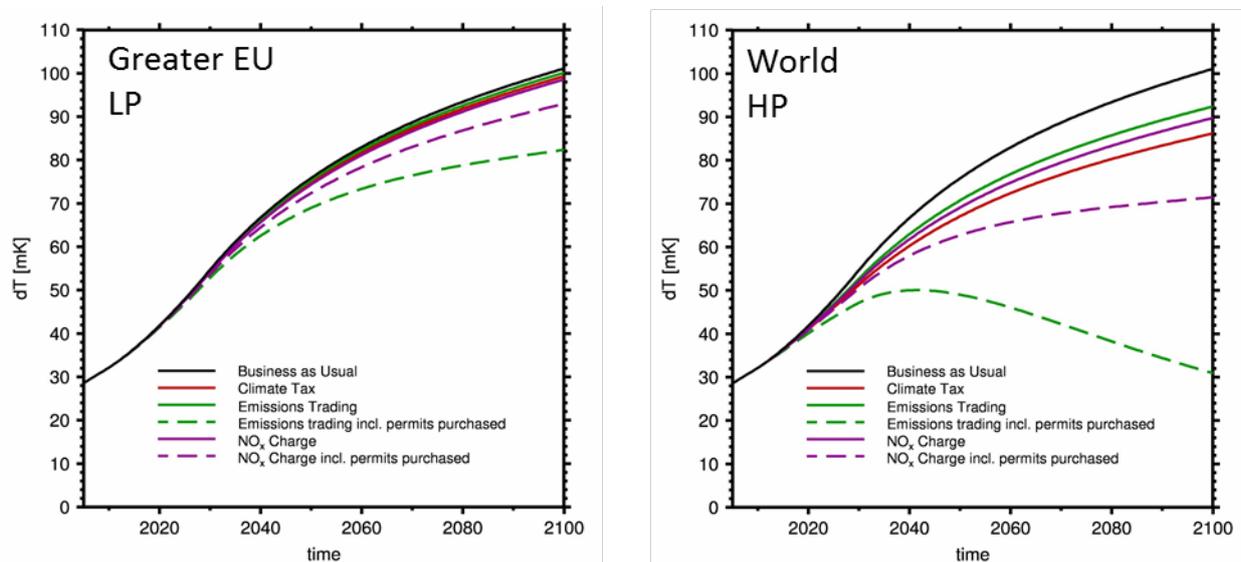


Quelle: Eigene Berechnungen. Angaben in Tg CO₂-Äquivalent.

6.2.2.2 Temperaturänderung

Der zeitliche Verlauf der Temperaturänderung ist in Abbildung 6-6 für die beiden Extremfälle „Greater EU“; Low Price Scenario und „World“; High Price Scenario dargestellt. Gezeigt wird jeweils das BaU-Szenario im Vergleich zu den geopolitischen sowie Preisszenarien mit den klimapolitischen Maßnahmen.

Abbildung 6-6: Zeitlicher Verlauf der Temperaturänderung in den Szenarien „Greater EU“ (Low Price Scenario) und „World“ (High Price Scenario) im Vergleich zum Business-as-usual-Szenario



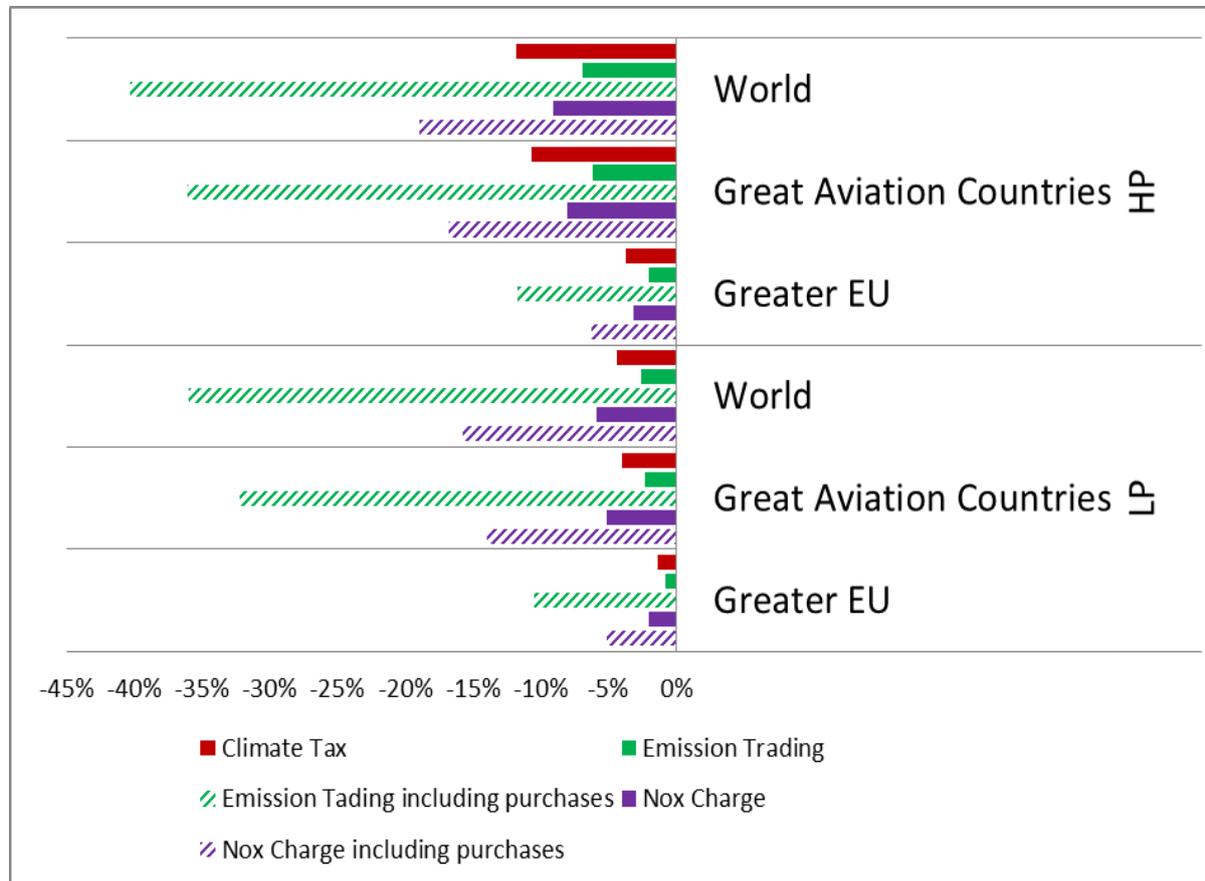
Quelle: Eigene Berechnungen.

Dabei zeigt sich, dass im ‚Greater EU‘-Szenario die drei klimapolitischen Instrumente ohne Berücksichtigung des Zukaufs von Emissionsrechten aus anderen Sektoren nur eine geringere Verringerung der Klimawirkung verursachen. Wird allerdings der Zukauf aus anderen Sektoren berücksichtigt, verstärkt sich die Reduzierung der Klimawirkung auf etwa 18% im Jahr 2100 für den Emissionshandel für alle klimarelevanten Gase. Für das geopolitische Szenario ‚World‘ unter der Annahme der hohen Preise des High Price Szenarios sind deutlich größere Einsparungen möglich: Ohne die Möglichkeit von Zukäufen von Emissionsrechten aus anderen Sektoren kann die Temperaturänderung im Jahr 2100 um bis zu 15% reduziert werden. Wird zusätzlich der Zukauf von Zertifikaten aus anderen Sektoren berücksichtigt, kann die Klimawirkung im Jahr 2100 um bis zu 70% reduziert werden. Dadurch dass beim Emissionshandel für alle klimarelevanten Gase mehr CO₂-Zertifikate aus anderen Sektoren gekauft werden, als im Luftverkehr an CO₂ emittiert wird, sinkt die Temperatur nach 2040 ab, obwohl konstante Emissionen ab 2030 angenommen wurden. Die steigende Temperatur nach 2030 der anderen betrachteten Szenarien wird durch die lange Lebenszeit von CO₂ verursacht, die dazu führt, dass sich CO₂ weiterhin in der Atmosphäre akkumuliert.

Ein Überblick über die Reduzierung der Klimawirkung in Abhängigkeit von den betroffenen geopolitischen Regionen und der Annahmen zur Preisentwicklung findet sich in Abbildung 6-7. Als Metrik wird atr 50 verwendet und über die Jahre 2010 bis 2060 gemittelt. Dabei zeigt sich erwartungsgemäß, dass die Klimawirkung am stärksten reduziert werden kann, wenn der Luftverkehr weltweit von den klimapolitischen Maßnahmen betroffen ist. Zudem zeigt das High Price Scenario (HP) einen deutlich stärkeren Einfluss auf die Klimawirkung als das Low Price Scenario (LP).

Das stärkste Reduktionspotential zeigt sich somit für das Szenario ‚World HP‘ für das klimapolitische Instrument des Emissionshandels auf alle klimarelevanten Gase unter Berücksichtigung der Möglichkeit, Emissionszertifikate von anderen Sektoren zu erwerben. Dabei kann die Klimawirkung gemessen in atr 50 um etwa 40% reduziert werden. Der Unterschied zu den zuvor gezeigten Werten von etwa 70% liegt in der Metrik begründet. Wird nur die Temperaturänderung im Jahr 2100 betrachtet, spielen vor allem die stark gesunkenen CO₂-Emissionen eine Rolle, da sich diese in der Atmosphäre akkumulieren würden und dadurch zu einer starken Temperaturerhöhung führen würden. Nimmt man hingegen atr 50 als Metrik, dominieren die kurzlebigen Effekte von NO_x und Kondensstreifen-Zirren, wodurch die starke Reduzierung der CO₂-Emissionen weniger stark ins Gewicht fällt.

Abbildung 6-7: Überblick über die relative Reduzierung der Klimawirkung durch die verschiedenen klimapolitischen Instrumente in Abhängigkeit von der gewählten geopolitischen Region und der Annahmen zur Preisentwicklung

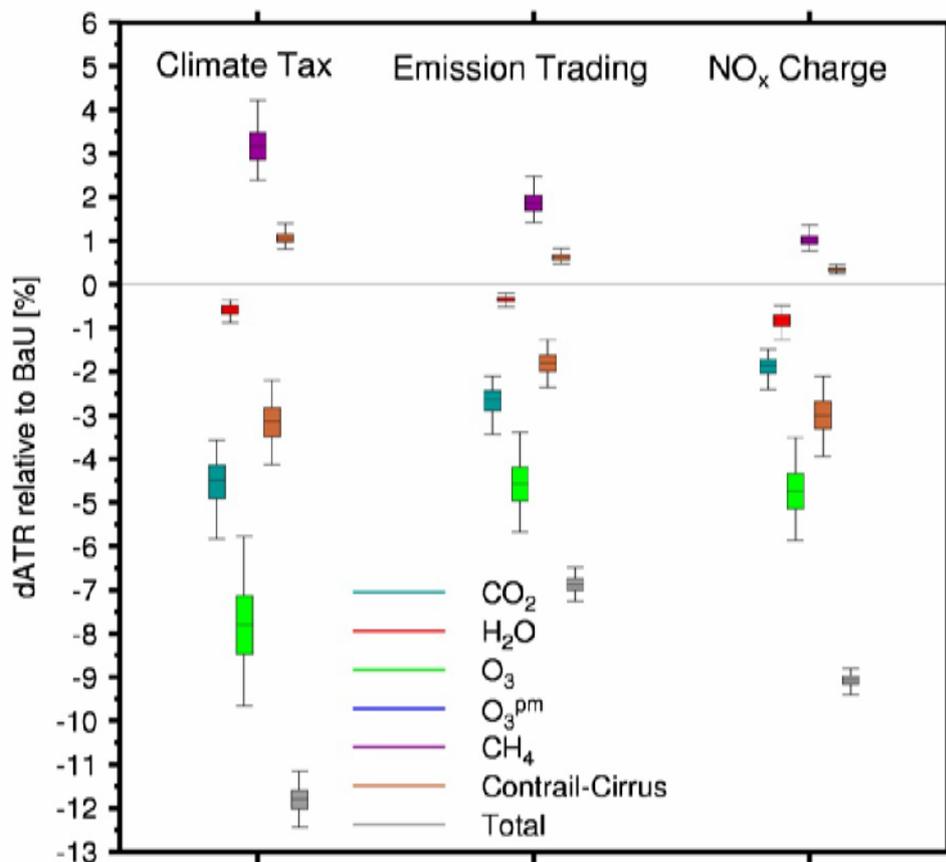


Quelle: Eigene Berechnungen.

Um sicherzustellen, dass die klimapolitischen Maßnahmen zu einer signifikanten Reduzierung der Klimawirkung führen, wurde eine Unsicherheitsanalyse mit Hilfe einer Monte-Carlo-Simulation durchgeführt. Die relativen Änderungen durch die weltweite Einführung der klimapolitischen Maßnahmen unter den Annahmen des High Price Szenarios sind in Abbildung 6-8 dargestellt. Systembedingt können die Zukäufe von Emissionsrechten nicht in der Unsicherheitsbetrachtung berücksichtigt werden. Deshalb sind nur die Effekte der Maßnahmen ohne Zukäufe an Emissionsrechten dargestellt. Dabei zeigt sich, dass sich die Gesamtklimawirkungen (graue Balken) signifikant von der des BaU-Szenarios unterscheidet. In dieser Darstellung kann auch gezeigt werden, welche Klimaspezies zu der Reduzierung der Klimawirkung beitragen. So führt die Einführung einer Klimasteuer zu einer Reduzierung der Klimawirkung um etwa 12%, wobei etwa 5% durch die Reduzierung der CO₂-Emission verursacht wird, etwa 3% durch die Reduzierung von Kondensstreifen-Zirren und etwa 4% von der Änderung der NO_x-Emissionen (O₃: - 8%, CH₄: 3%, O₃^{pm}:1%) verursacht wird. Die Einführung eines globalen Emissionshandels für alle

klimarelevanten Gase führt zu einer Reduzierung der Klimawirkung um etwa 7%, wobei CO₂ und Kondensstreifen-Zirren jeweils etwa 3% und NO_x etwa 2% ausmachen. Die Einführung eines NO_x-Entgeltes (kombiniert mit einem CO₂-Emissionshandel und operationellen Maßnahmen) führt zu einer Reduzierung der Klimawirkung um etwa 9%, wobei CO₂ etwa 2% verursacht und Kondensstreifen-Zirrus etwa 3% sowie NO_x etwa 4% beitragen.

Abbildung 6-8: Änderung der Gesamtklimawirkung relativ zum BAU-Szenario und die Beiträge der einzelnen Klimaspezies zu dieser Änderung



Quelle: Eigene Berechnungen. Dargestellt sind jeweils der Median sowie die 2.5, 25,75 und 97.5 Perzentilen als Unsicherheitsbalken.

7 Modellierungsergebnisse: Beschäftigungseffekte der klimapolitischen Maßnahmen

Im Folgenden werden die Beschäftigungseffekte der Luftverkehrsgesellschaften differenziert nach klimapolitischen Instrumenten und Szenarien für alle Staaten dargestellt. Anders als ursprünglich geplant, haben wir uns dagegen entschieden, auch die gesamtwirtschaftlichen Wachstumseffekte der klimapolitischen Maßnahmen und Szenarien abzuschätzen. Dies kann damit begründet werden, dass hierfür belastbare Prognosen zur gesamtwirtschaftlichen Entwicklung sämtlicher hier analysierter Länder für eine Business-as-usual-Entwicklung auf Einzelstaatenebene notwendig wären. Solche Prognosen liegen jedoch nicht in der erforderlichen Differenzierung und Belastbarkeit vor. Aufgrund dessen konzentrieren sich die nachfolgenden Ausführungen auf unsere modellgestützten Abschätzungen der Beschäftigungseffekte der klimapolitischen Maßnahmen.

Hierbei werden sowohl die direkten Effekte (Zahl der Erwerbstätigen der Luftverkehrsgesellschaften) als auch die indirekten Effekte geschätzt. Als indirekte Effekte wird die Zahl der Erwerbstätigen bezeichnet, die durch ökonomische Aktivitäten der Luftverkehrsgesellschaften in allen anderen ökonomischen Bereichen – berechnet über die gesamte Vorleistungskette – entstehen. Auf diese Weise können auch Hinweise zu den Verteilungseffekten der klimapolitischen Instrumente erhalten werden.

7.1 Methodik

7.1.1 Luftverkehrsgesellschaften

Als Datenbasis dienen die nationalen Input-Output-Tabellen der World Input-Output-Database (European Commission, 2013). Die Datenbasis deckt vierzig Länder ab (Tabelle 7-1) und erstreckt sich über den Zeitraum 1995 bis 2011.

Tabelle 7-1: Nationale Input-Output Tabellen: Länderliste

Australia	Ireland
Austria	Italy
Belgium	Japan
Bulgaria	Korea
Brazil	Lithuania
Canada	Luxembourg
China	Latvia
Cyprus	Mexico
Czech Republic	Malta
Denmark	Netherlands
Spain	Poland
Estonia	Portugal
Finland	Romania
France	Russia
United Kingdom	Slovak Republic
Germany	Slovenia
Greece	Sweden
Hungary	Turkey
Indonesia	Taiwan
India	United States

Quelle: European Commission (2013).

Diese vierzig Staaten sind für über 90% der weltweiten Passagierzahlen verantwortlich. Für jedes Land werden auf Basis der jeweiligen Input-Output-Tabellen die direkten Beschäftigungseffekte der Luftverkehrsgesellschaften den jeweiligen Daten der Volkswirtschaftlichen Gesamtrechnungen (European Commission, 2013) entnommen, und die indirekten Effekte mit Hilfe eines statischen offenen Leontief-Modells geschätzt (z. B. Statistisches Bundesamt, 2010). Für alle übrigen Länder werden die direkten Beschäftigungseffekte den jeweiligen Volkswirtschaftlichen Gesamtrechnungen (UNSD verschiedene Jahrgänge, Eurostat verschiedene Jahrgänge) – soweit verfügbar – entnommen, und die fehlenden Daten um ASCEND-Daten (ASCEND verschiedene Jahrgänge) ergänzt. Die entsprechenden indirekten Effekte werden über Analogieschlüsse ermittelt, indem die Vorleistungsstrukturen vergleichbarer Länder für diese übernommen werden.

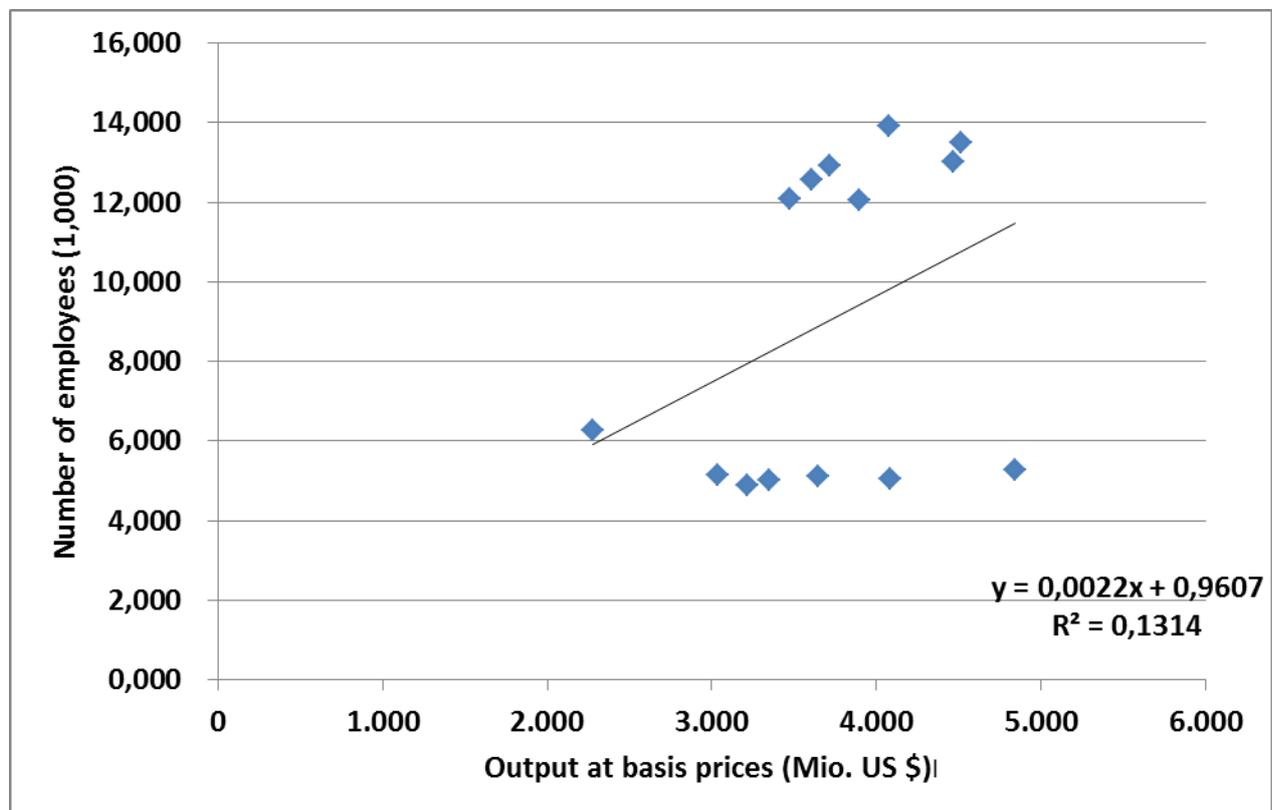
Ausgangsjahr der Modellierung ist das Jahr 2008. Dies kann folgendermaßen begründet werden: Zum Zeitpunkt der Modellerstellung waren die Input-Output-Tabellen nur für die Jahre 1995 bis 2009 verfügbar. Das Jahr 2009 war wegen der globalen ökonomischen Krise als Ausgangsbasis ungeeignet. Auf der Grundlage von Eckdaten der Volkswirtschaftlichen Gesamtrechnungen

nungen werden die Daten des Jahres 2008 auf 2010 hochgerechnet, so dass für alle Länder direkte und indirekte Beschäftigungseffekte für das Jahr 2010 zur Verfügung stehen.³

Die ökonomischen Effekte der Aktivitäten der Luftverkehrsgesellschaften sind in den Input-Output-Tabellen durch den Produktionsbereich Luftfahrtleistungen abgebildet, definiert nach der Systematik der Produktionsbereiche. Diese enthalten jedoch nicht alle ökonomische Aktivitäten der Luftverkehrsgesellschaften. Sie sind bereinigt um die Nebenleistungen, die anderen Produktionsbereichen zugeordnet sind (z. B. Catering). Es werden somit nur die Tätigkeiten im Passagier- und Frachtverkehr, dem Kern der Luftverkehrsgesellschaften, erfasst.

Für die Szenarien war ursprünglich geplant, eine Regression der Zahl der Erwerbstätigen der Luftverkehrsgesellschaften in Abhängigkeit von den Produktionswerten - dem volkswirtschaftlichen Äquivalent der Umsätze - durchzuführen. Dieser Ansatz erwies sich jedoch für die meisten Länder als ungeeignet, wie das nachfolgende Beispiel für Belgien zeigt (Abbildung 7-1).

Abbildung 7-1: Regressionsergebnisse für Basispreise und Zahl der Erwerbstätigen im belgischen Luftverkehr im Zeitraum 1995 – 2008



Quelle: European Commission, 2013 und eigene Berechnungen.

³ Inzwischen liegen die Input-Output-Tabellen auch für die Jahre 2010 und 2011 vor. Diese Aktualisierung konnte in dieser Studie nicht mehr berücksichtigt werden.

Dies ist auf die Strukturänderungen nationaler Fluggesellschaften in der Vergangenheit zurückzuführen – in Belgien an der Liquidation von SABENA Ende 2001.

Deshalb wurde wie folgt vorgegangen: Es wurde grundsätzlich angenommen, dass sich die Zahl der direkten Erwerbstätigen der Luftverkehrsgesellschaften wie die Wachstumsraten der Szenario- und instrumentenspezifischen Umsätze unter Berücksichtigung abnehmender Arbeitsintensitäten entwickelt. Im Einzelnen wurden folgende Annahmen getroffen:

- Die Umsätze jedes einzelnen Landes im Luftverkehrsbereich wachsen mit denselben Raten wie diejenigen der Ländergruppe, zu denen sie gehören.
- Es wurden gleichbleibende Produktionsstrukturen bei den nationalen Airlines unterstellt.
- Die Arbeitsintensitäten entwickeln sich im Betrachtungszeitraum wie im Schnitt der Jahre 1995 bis 2008, in den Industrieländern wie in Deutschland (-2% p.a.), in den Schwellenländern wie in China (-6% p.a.) und den Entwicklungsländern wie in Mexiko (-4% p.a.).⁴ Sie werden bei allen Szenarien- und Instrumentenkombinationen beibehalten.

Das Verhältnis der indirekten zu den direkten Erwerbstätigenzahlen bleibt über die Jahre konstant. Dies ist die übliche Vorgehensweise bei statischen Input-Output-Analysen.

Da die Instrumente ihre Wirkung bereits im Jahr 2010 entfalten, sind die Ausgangsdaten für 2010 bereits je nach Szenarien-Instrumenten-Kombination unterschiedlich.

7.1.2 Luftfahrtindustrie und Flughäfen

Ursprünglich war geplant, auch die direkten Beschäftigungseffekte der Luftfahrtindustrie und der Flughäfen zu schätzen. Dies erwies sich im Laufe der Studie jedoch aus folgenden Gründen als nicht durchführbar: Zwar sind Daten für die direkt Erwerbstätigen in der Luftfahrtindustrie weltweit in ausreichendem Umfang vorhanden (UNSD, verschiedene Jahrgänge, Eurostat, verschiedene Jahrgänge). Eine Regression der entsprechenden Erwerbstätigenzahlen mit den Umsätzen der nationalen Luftverkehrsgesellschaften ist jedoch irreführend. Denn die Produktion der Luftfahrtindustrie und damit deren Erwerbstätigenzahlen sind abhängig von der Entwicklung der weltweiten Luftverkehrsflotte, für die keine szenario- und instrumentenabhängigen Prognosen

⁴ Für diese drei Staaten konnten statistisch signifikante Regression zwischen der Zahl der Erwerbstätigen und den Produktionswerten ermittelt werden.

sen vorliegen. Zudem ist in den nationalen Input-Output-Tabellen die Luftfahrtindustrie nicht abgebildet. Sie ist Teil des Fahrzeugbaus insgesamt. Von den Vorleistungsstrukturen des Fahrzeugbaus auf diejenigen der Luftfahrtindustrie zu schließen, ist ohne zusätzliche Daten nur mit stark vereinfachenden und vermutlich die Ergebnisse verfälschenden Annahmen möglich.

Ökonomische Daten zu den Flughäfen werden in den Volkswirtschaftlichen Gesamtrechnungen in der Regel nicht veröffentlicht (Ausnahme Deutschland und Italien). Verschiedene Publikationen und wissenschaftliche Untersuchungen liefern dazu Daten, aber die Abgrenzungen der Flughafenaktivitäten sind sehr heterogen (z.B. mit und ohne Non-Aviation-Bereich, nur an Flughäfen oder für die Flughafenregion), so dass für direkten Effekte auf die Flughäfen keine verlässlichen Schätzungen vorgenommen werden konnten. Über die nachfolgend gezeigten Vorleistungseffekte werden jedoch auch die Wirkungen der klimapolitischen Instrumente auf die Flughäfen und die Flugzeughersteller ausgewiesen.

7.2 Beschäftigungseffekte der klimapolitischen Maßnahmen

Die folgenden Ausführungen konzentrieren sich auf die Darstellung der Ergebnisse für die geopolitischen Szenarien „Greater EU“, „Great Aviation Countries“ und „World“. Gezeigt werden die Beschäftigungseffekte für alle drei klimapolitischen Maßnahmen für die Metrik atr 50 und die Preiselastizität -0,8 (Überwälzungsfall 2). Es werden die Ergebnisse für alle drei Preisszenarien dargestellt. Weitere Modellierungsergebnisse werden nur exemplarisch erwähnt.

Tabelle 7-2 zeigt zum Vergleich die Entwicklung der Zahl der Erwerbstätigen (direkt und indirekt) in der Business-as usual-Entwicklung.

Tabelle 7-2: Zahl der Erwerbstätigen (1.000) direkte und indirekte Effekte weltweit - Business-as-usual

Year	Business-as-usual
2010	4,439
2015	5,310
2020	6,159
2025	6,982
2030	7,930

Quelle: Eigene Berechnungen.

7.2.1 Szenario „Greater EU“

Die Ergebnisse sind in den Tabellen 7-3 bis 7-5 zusammengefasst. Grafisch dargestellt sind sie in Abbildung 7-2 für das High Price Szenario.

Tabelle 7-3: Szenario „Greater EU“: Zahl der Erwerbstätigen (1.000) direkte und indirekte Effekte weltweit – Emissionshandel, atr 50, Preiselastizität -0,8 (Fall 2)

Year	Low Price Scenario	High Price Scenario	Mixed Price Scenario
2010	4,434	4,434	4,434
2015	5,035	5,025	5,035
2020	5,484	5,455	5,484
2025	5,697	5,639	5,697
2030	6,142	6,048	6,142

Quelle: Eigene Berechnungen.

Tabelle 7-4: Szenario „Greater EU“: Zahl der Erwerbstätigen (1.000) direkte und indirekte Effekte weltweit – Klimasteuer, atr 50, Preiselastizität -0,8 (Fall 2)

Year	Low Price Scenario	High Price Scenario	Mixed Price Scenario
2010	4,410	4,410	4,410
2015	4,884	4,852	4,852
2020	5,291	5,223	5,223
2025	5,566	5,325	5,325
2030	6,094	5,919	5,919

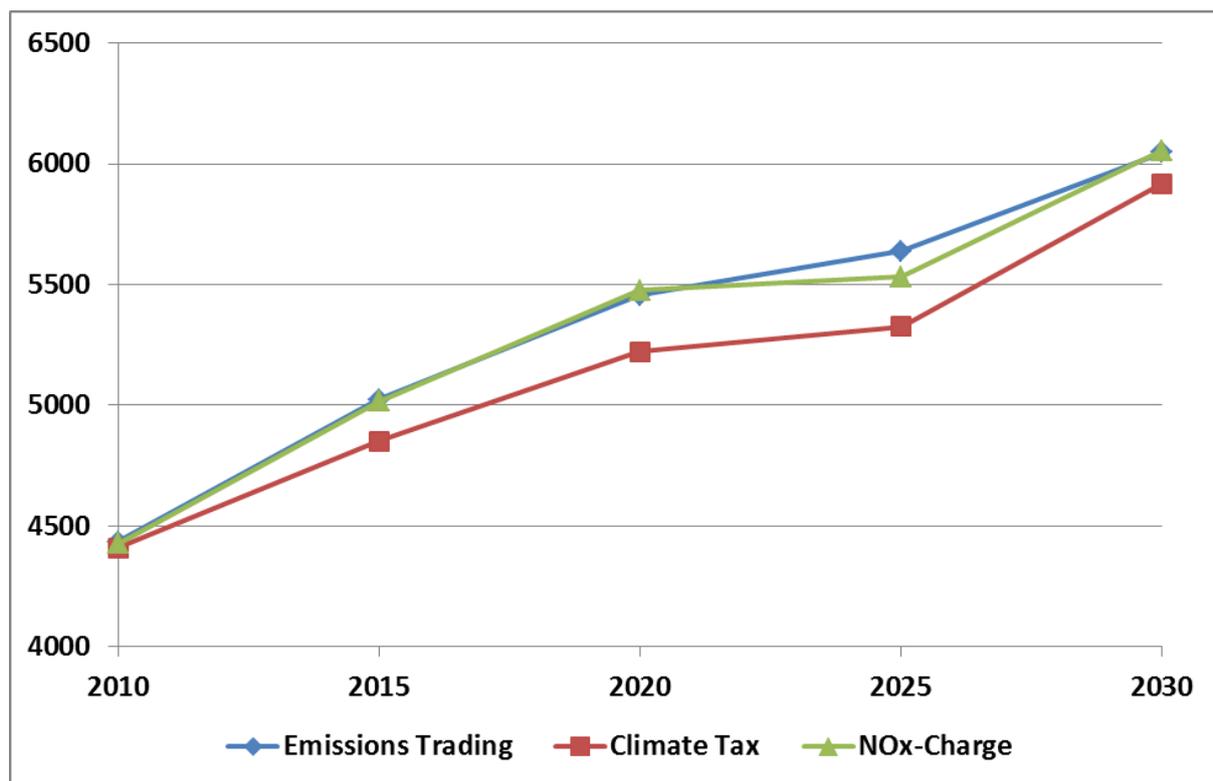
Quelle: Eigene Berechnungen.

Tabelle 7-5: Szenario „Greater EU“: Zahl der Erwerbstätigen (1.000) direkte und indirekte Effekte weltweit – NO_x-Entgelt, atr 50, Preiselastizität -0,8 (Fall 2)

Year	Low Price Scenario	High Price Scenario	Mixed Price Scenario
2010	4,428	4,428	4,428
2015	5,030	5,015	5,015
2020	5,482	5,477	5,477
2025	5,660	5,531	5,531
2030	6,151	6,055	6,055

Quelle: Eigene Berechnungen.

Abbildung 7-2: Szenario „Greater EU“: Zahl der Erwerbstätigen (1.000) direkt und indirekt weltweit im Instrumentenvergleich, atr 50, Preiselastizität -0,8, High Price Szenario



Quelle: Eigene Berechnungen.

In allen Fällen nimmt die Zahl der Erwerbstätigen zu. Die Wachstumsraten liegen zwischen 34,2% (Climate Tax, High Price Szenario) und 38,9% (NO_x-Charge, Low Price Szenario).

7.2.2 Szenario „Great Aviation Countries“

Die Ergebnisse sind in den Tabellen 7-6 bis 7-8 zusammengefasst. Grafisch dargestellt sind sie in Abbildung 7-3 für das High Price Szenario.

Tabelle 7-6: Szenario „Great Aviation Countries“: Zahl der Erwerbstätigen (1.000) direkte und indirekte Effekte weltweit – Emissionshandel, atr 50, Preiselastizität -0,8 (Fall 2)

Year	Low Price Scenario	High Price Scenario	Mixed Price Scenario
2010	4,416	4,416	4,416
2015	4,983	4,900	4,983
2020	5,399	5,295	5,399
2025	5,583	5,377	5,583
2030	5,971	5,603	5,971

Quelle: Eigene Berechnungen.

Tabelle 7-7: Szenario „Great Aviation Countries“: Zahl der Erwerbstätigen (1.000) direkte und indirekte Effekte weltweit – Klimasteuer, atr 50, Preiselastizität -0,8 (Fall 2)

Year	Low Price Scenario	High Price Scenario	Mixed Price Scenario
2010	4,335	4,335	4,335
2015	4,764	4,651	4,651
2020	5,127	4,895	4,895
2025	5,456	5,057	5,057
2030	5,859	5,293	5,293

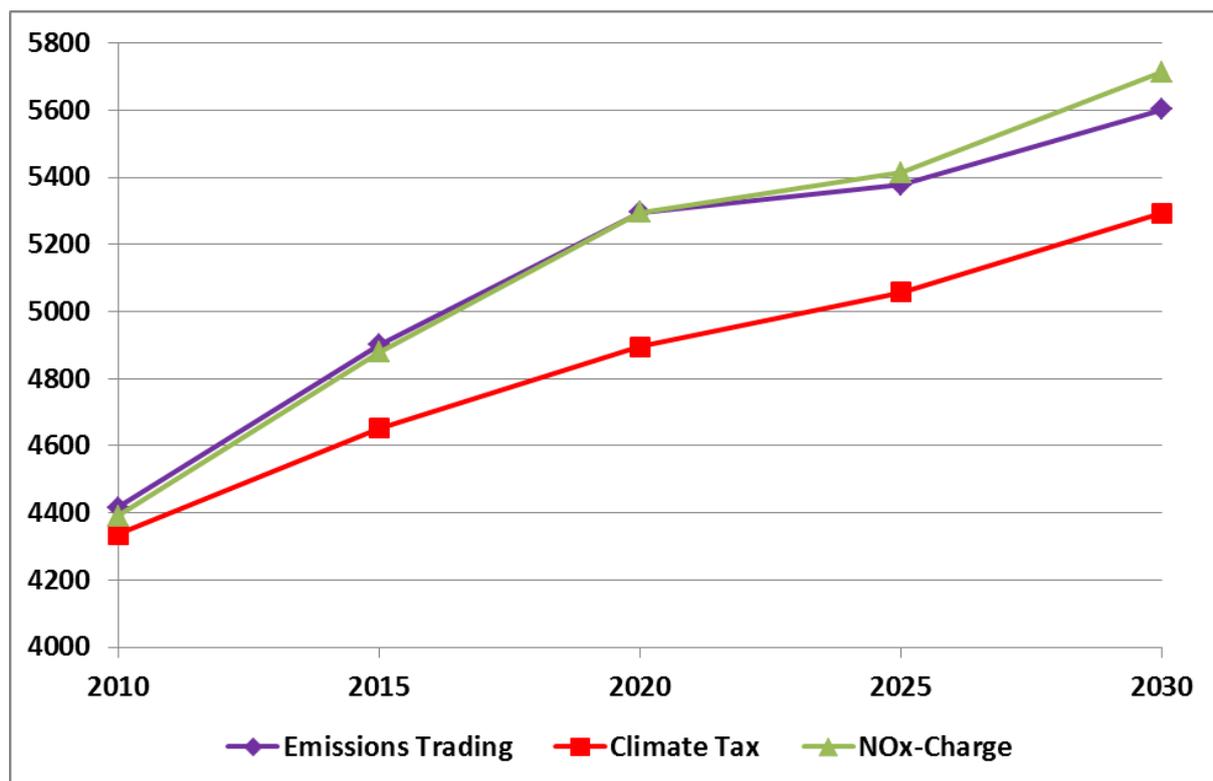
Quelle: Eigene Berechnungen.

Tabelle 7-8: Szenario „Great Aviation Countries“: Zahl der Erwerbstätigen (1.000) direkte und indirekte Effekte weltweit – NO_x-Entgelt, atr 50, Preiselastizität -0,8 (Fall 2)

Year	Low Price Scenario	High Price Scenario	Mixed Price Scenario
2010	4,390	4,390	4,390
2015	4,920	4,878	4,878
2020	5,396	5,296	5,296
2025	5,596	5,414	5,414
2030	6,010	5,713	5,713

Quelle: Eigene Berechnungen.

Abbildung 7-3: Szenario „Great Aviation Countries“: Zahl der Erwerbstätigen (1.000) direkt und indirekt weltweit im Instrumentenvergleich, atr 50, Preiselastizität -0,8, High Price Scenario



Quelle: Eigene Berechnungen.

Auch hier nimmt die Zahl der Erwerbstätigen in allen Fällen zu. Die Wachstumsraten liegen zwischen 22,1% (Climate Tax, High Price Scenario) und 36,9% (NO_x-Charge, Low Price Scenario).

7.2.3 Szenario "World"

Die Ergebnisse sind in den Tabellen 7-9 bis 7-11 zusammengefasst. Grafisch dargestellt sind sie in Abbildung 7-4 für das High Price Szenario.

Tabelle 7-9: Szenario „World“: Zahl der Erwerbstätigen (1.000) direkte und indirekte Effekte weltweit – Emissionshandel, atr 50, Preiselastizität -0,8 (Fall 2)

Year	Low Price Scenario	High Price Scenario	Mixed Price Scenario
2010	4,412	4,412	4,412
2015	4,853	4,806	4,853
2020	5,221	5,091	5,221
2025	5,549	5,296	5,549
2030	5,951	5,552	5,951

Quelle: Eigene Berechnungen.

Tabelle 7-10: Szenario „World“: Zahl der Erwerbstätigen (1.000) direkte und indirekte Effekte weltweit – Klimasteuer, atr 50, Preiselastizität -0,8 (Fall 2)

Year	Low Price Scenario	High Price Scenario	Mixed Price Scenario
2010	4,307	4,307	4,307
2015	4,721	4,580	4,580
2020	5,071	4,784	4,784
2025	5,390	4,903	4,903
2030	5,788	5,102	5,102

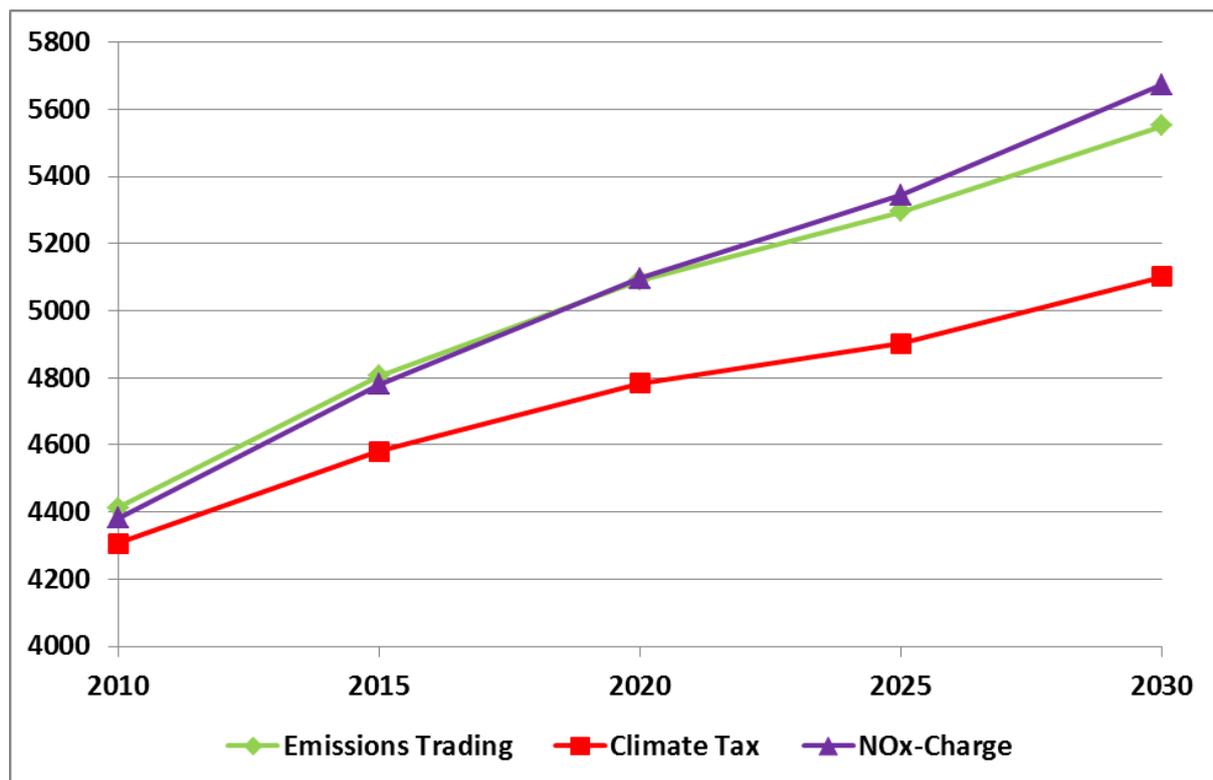
Quelle: Eigene Berechnungen.

Tabelle 7-11: Szenario „World“: Zahl der Erwerbstätigen (1.000) direkte und indirekte Effekte weltweit – NO_x-Entgelt, atr 50, Preiselastizität -0,8 (Fall 2)

Year	Low Price Scenario	High Price Scenario	Mixed Price Scenario
2010	4,381	4,381	4,381
2015	4,833	4,780	4,780
2020	5,220	5,096	5,096
2025	5,568	5,344	5,344
2030	5,995	5,673	5,673

Quelle: Eigene Berechnungen.

Abbildung 7-4: Szenario „World“: Zahl der Erwerbstätigen (1.000) direkt und indirekt weltweit im Instrumentenvergleich, atr 50, Preiselastizität -0,8, High Price Scenario



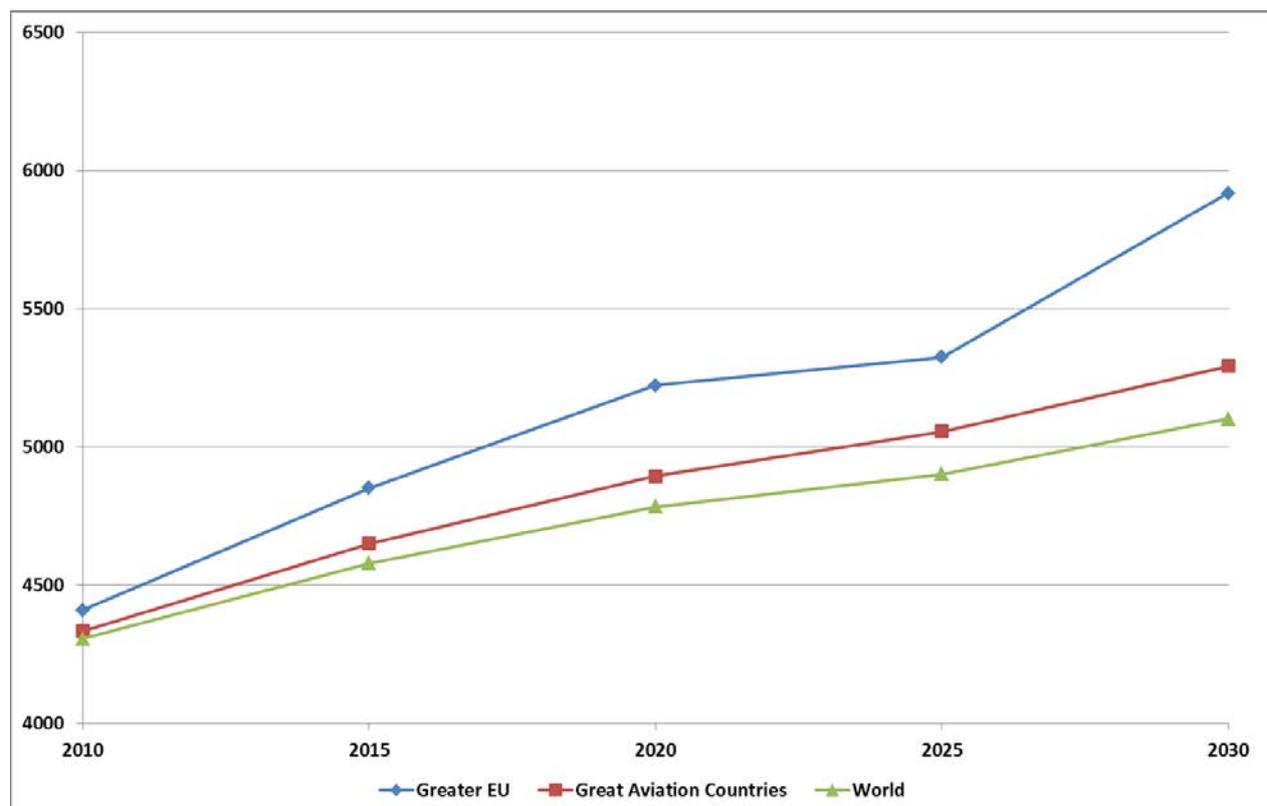
Quelle: Eigene Berechnungen.

Auch im geopolitischen Szenario „World“ nimmt die Zahl der Erwerbstätigen bei allen klimapolitischen Instrumenten zu. Die Wachstumsraten liegen zwischen 18,4% (Climate Tax, High Price Szenario) und 36,8% (NO_x-Charge, Low Price Szenario).

7.2.4 Vergleich der geopolitischen Szenarien

Abbildung 7-5 zeigt die geopolitischen Szenarien im Vergleich am Beispiel der Klimasteuer für das High Price Szenario, die Preiselastizität $-0,8$ (Überwälzungsfall 2) und die Metrik atr 50.

Abbildung 7-5: Vergleich der geopolitischen Szenarien: Zahl der Erwerbstätigen (1.000) direkt und indirekt weltweit, Klimasteuer, atr 50, Preiselastizität $-0,8$, High Price Szenario



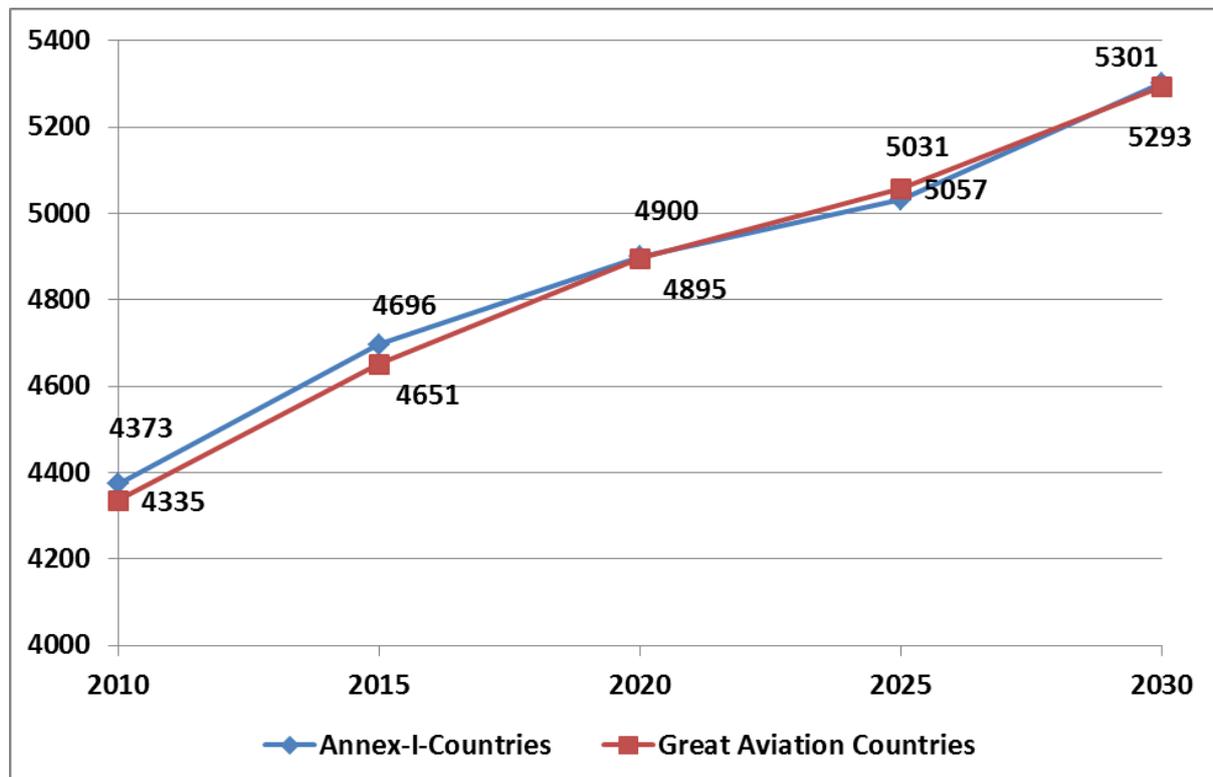
Quelle: Eigene Berechnungen.

Wenn die Klimasteuer weltweit eingeführt würde, so zeigen sich unter den Annahmen des High Price Szenarios, einer Preiselastizität von $-0,8$, der Metrik atr 50 und den unterstellten Entwicklungen der Arbeitsintensitäten die stärksten Wirkungen auf die Entwicklung der Erwerbstätigenzahlen im globalen Luftverkehr. Die Erwerbstätigenzahlen nehmen dann weltweit im Zeitraum 2010 bis 2030 nur um jährlich $0,8\%$ zu. Im Vergleich dazu würden die Erwerbstätigenzahlen um über $1,0\%$ p. a. zunehmen, wenn die Klimasteuer nur in den "Great Aviation Countries" eingeführt werden, bzw. $1,5\%$ p. a. bei Implementierung in den Ländern von "Greater EU". Dies bedeutet in allen Fällen eine Abschwächung gegenüber dem Wachstum im Zeitraum 1995 bis 2008, in dem die Zahl der Erwerbstätigen weltweit jährlich um $1,8\%$ wuchs.

7.2.5 Exemplarische Darstellung weiterer Szenarien-Instrumenten-Kombinationen

Die Ergebnisse für das geopolitische Szenario „Annex-I-Countries“ unterscheiden sich nur wenig von denen für das Szenario „Great Aviation Countries“. Dies ist beispielhaft in Abbildung 7-6 dargestellt, die die Entwicklung der Zahl der Erwerbstätigen der beiden geopolitischen Szenarien für die Klimasteuer unter den Annahmen des High Price Scenarios, einer Preiselastizität von $-0,8$ und der Metrik atr 50 zeigt.

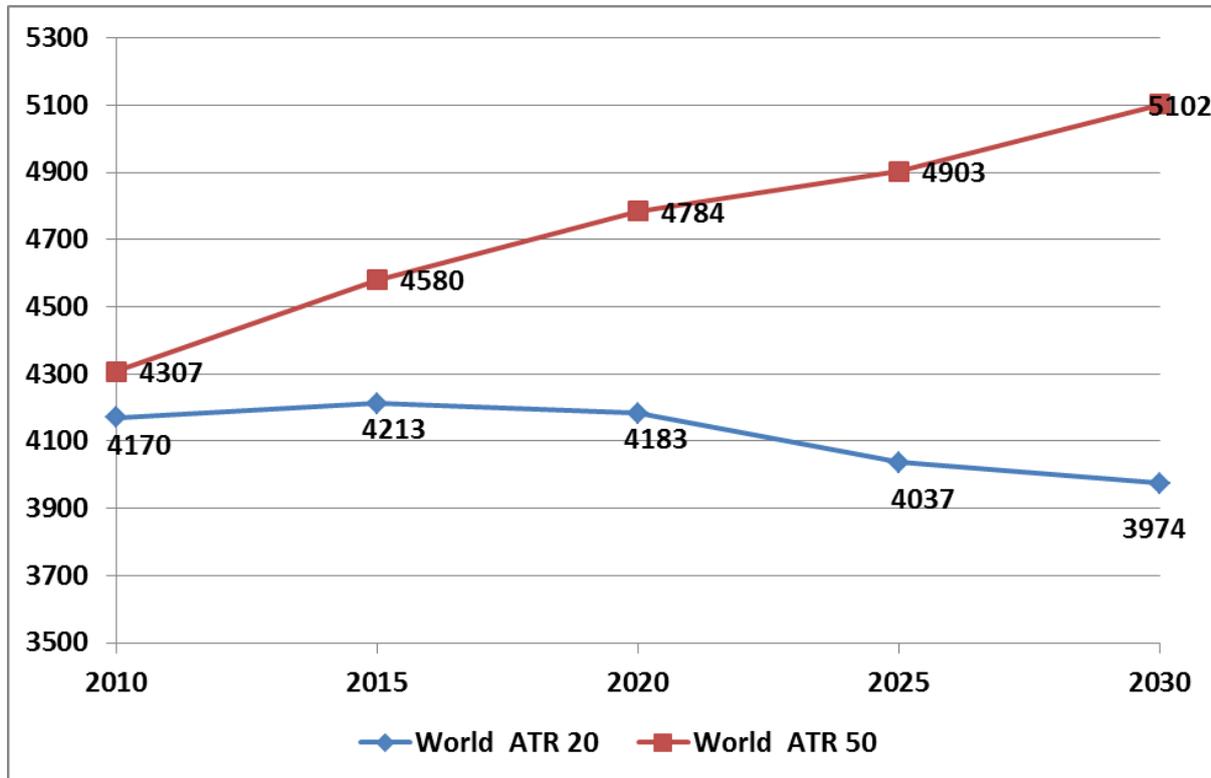
Abbildung 7-6: Vergleich der geopolitischen Szenarien „Annex-I-Countries“ und „Great Aviation Countries“: Zahl der Erwerbstätigen (1.000) direkt und indirekt weltweit, Klimasteuer, atr 50, Preiselastizität $-0,8$, High Price Szenario



Quelle: Eigene Berechnungen.

Enorme Unterschiede hinsichtlich der Entwicklung der Zahl der Erwerbstätigen ergeben sich, wenn man an Stelle der Metrik atr 50 die Metrik atr 20 annimmt. Wie Abbildung 7-7 für das geopolitische Szenario „World“ für die Klimasteuer (High Price Szenario, Preiselastizität $-0,8$) zeigt, wird in diesem Fall die Zahl der Erwerbstätigen im Vergleich zu 2010 sogar sinken, insbesondere zwischen den Jahren 2020 und 2030.

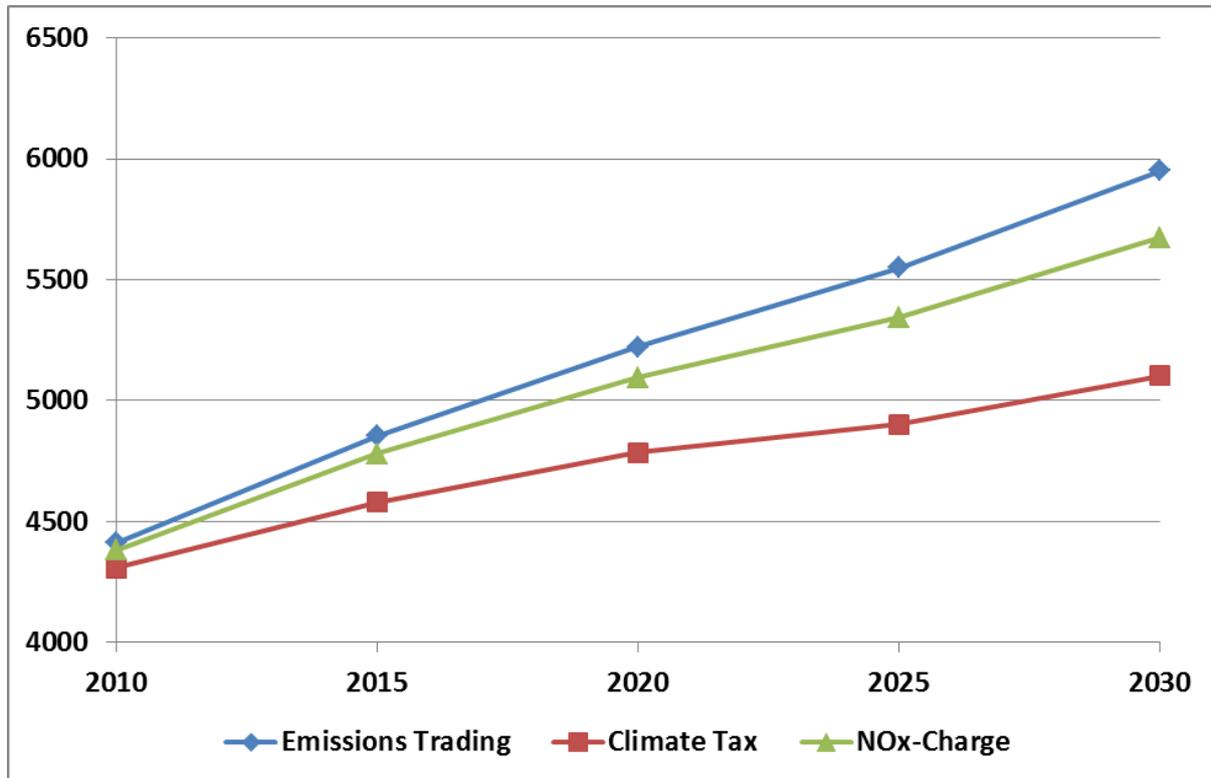
Abbildung 7-7: Szenario „World“: Zahl der Erwerbstätigen (1.000) direkt und indirekt weltweit, Klimasteuer, atr 20 und atr 50, Preiselastizität -0,8, High Price Scenario



Quelle: Eigene Berechnungen.

Abbildung 7-8 zeigt die unterschiedliche weltweite Arbeitsplatzentwicklung der Luftverkehrsgesellschaften im Szenario „World“ für die klimapolitischen Instrumente für das „Mixed Price Scenario“, die Preiselastizität -0,8 (Überwälzungsfall 2) und die Metrik atr 50.

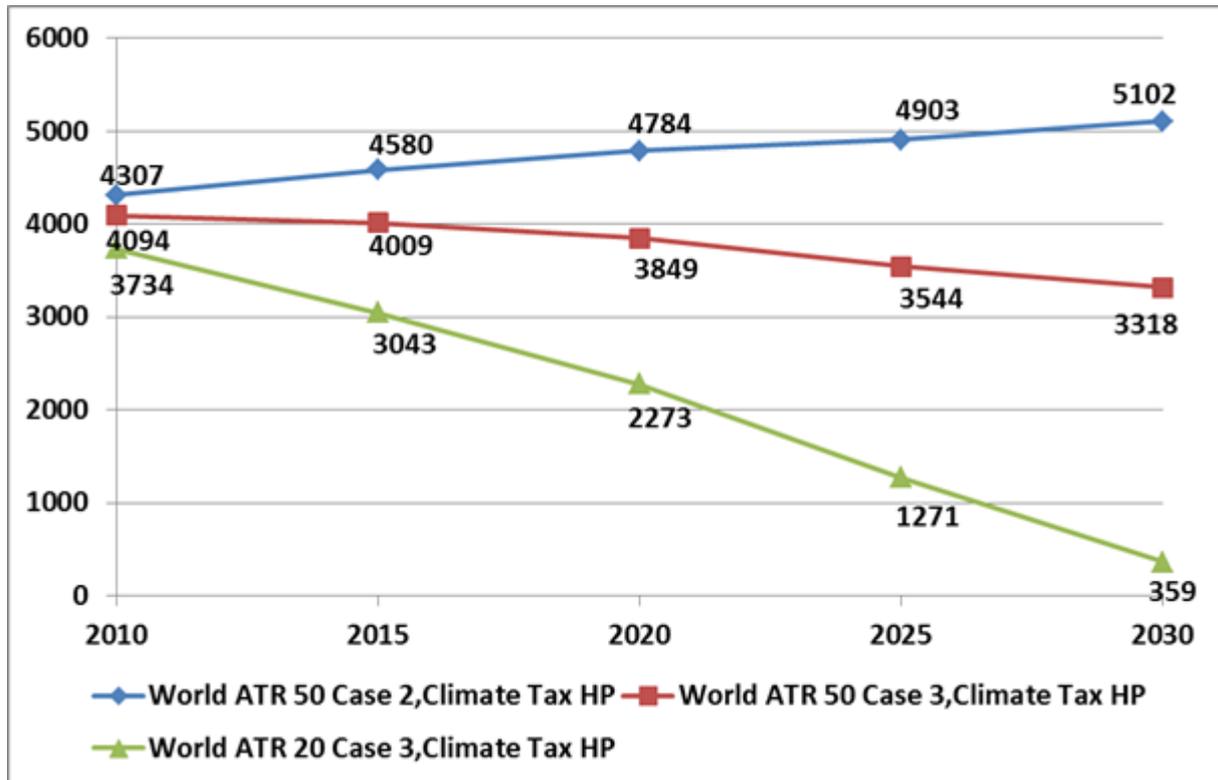
Abbildung 7-8: Szenario „World“: Zahl der Erwerbstätigen (1.000) direkt und indirekt weltweit im Instrumentenvergleich, atr 50, Preiselastizität -0,8, Mixed Price Scenario



Quelle: Eigene Berechnungen.

Wird die Klimasteuer weltweit eingeführt, die Metrik atr 20 und die Preise des High Price Scenarios angewendet und die Nachfrager würden mit einer Preiselastizität von -2,1% reagieren, so käme dies einem Zusammenbruch des weltweiten Luftverkehrs sehr nahe. Die Zahl der Erwerbstätigen im Luftverkehr betrüge dann im Jahre 2030 nur mehr rund 1/10 derjenigen des Jahres 2010 wie Abbildung 7-9 zeigt.

Abbildung 7-9: Szenario „World“: Zahl der Erwerbstätigen (1.000) direkt und indirekt weltweit, Klimasteuer, atr 20 und atr 50, Preiselastizität -0,8 und -2,1, High Price Scenario



Quelle: Eigene Berechnungen.

7.3 Exkurs: Gesellschaftlicher Nutzen der klimapolitischen Maßnahmen im Luftverkehr

Die im Rahmen des Projekts AviClim untersuchten klimapolitischen Instrumente und Maßnahmen führen auf der einen Seite zu den in den vorangegangenen Kapiteln dargestellten Kosten, Nachfrageeffekten, Effekten auf die Verkehrsleistung und auf die Beschäftigung. Auf der anderen Seite haben die klimapolitischen Instrumente und Maßnahmen die beabsichtigten positiven Auswirkungen auf die klimarelevanten Emissionen des Luftverkehrs und die Klimawirkung des Sektors. Ökonomisch spricht man hier von sog. positiven externen Effekten. Eine monetäre Bewertung dieser positiven Effekte ist nicht ganz unproblematisch, da hierzu eine Reihe von durchaus erörterungswürdigen Annahmen formuliert werden müssen. Insbesondere ein Vergleich und eine Bewertung des Nutzens der Reduktion verschiedener Emissionsspezien stellt in diesem Zusammenhang eine besondere Herausforderung dar.

Im Prinzip gibt es vier verschiedene methodische Herangehensweisen zur monetären Bewertung von negativen wie positiven externen Effekten:

- Die Abschätzung der Kosten, die durch die zusätzlichen Schäden (Grenzscha'den) des Klimawandels verursacht werden. Hier wird beispielsweise versucht zu quantifizieren, welche Kosten für die Beseitigung von Sturmscha'den an Geba'uden entstehen. Werden diese Kosten durch klimapolitische Ma'nahmen vermieden, ko'nnen auf diese Weise spiegelbildlich die positiven externen Effekte solcher Ma'nahmen ermittelt werden.
- Die Quantifizierung der Nutzenverluste, die bei den Menschen oder der Menschheit insgesamt durch die negativen externen Effekte des Klimawandels hervorgerufen werden. Umgekehrt betrachtet kann der zus'a'tzliche Nutzen durch den vermiedenen Klimawandel aufgrund der klimapolitischen Ma'nahmen zur Bewertung der positiven externen Effekte herangezogen werden. Methodisch kann man sich dieser Fragestellung durch Befragungen zur Zahlungsbereitschaft na'hern. So ko'nnen beispielsweise Betroffene gefragt werden, wieviel ihnen die Vermeidung des Klimawandels ausgedr'uckt in monet'a'ren Einheiten wert ist.
- Eine weitere Mo'glichkeit zur Monetarisierung von externen Effekten ist der sog. Vermeidungskostenansatz. Bei diesem Ansatz wird untersucht, welche Kosten mit der Vermeidung einer zus'a'tzlichen Einheit klimarelevanter Gase verbunden sind. O'konomisch spricht man hier von Grenzvermeidungskosten fu'r klimascha'digende Substanzen. Hierfu'r

werden die Kosten für technologische, operationelle und sonstige Maßnahmen zur Vermeidung dieser Emissionen geschätzt. Dabei ist zu berücksichtigen, dass die Bandbreite der Grenzvermeidungskosten über alle Emittentengruppen (Private Haushalte, Dienstleistungssektor inkl. Verkehr, Energieerzeugung, Industrie) sehr groß ist.

- Schließlich kann auch eine Bewertung der Risiken, die mit möglichen Klimaschäden verbunden sind, versucht werden. Insbesondere geht es hier um die Monetarisierung von Risiken, bei denen mit einer sehr geringen Wahrscheinlichkeit sehr große Schäden auftreten können. Ein Beispiel hierfür wären die Risiken, die durch eine klimabedingte Verlagerung des Golfstroms entstehen. Für diese, methodisch sehr anspruchsvolle Fragestellung müssen die Risikopräferenzen der Betroffenen bekannt sein, was zumeist jedoch nicht der Fall ist (INFRAS/ECONCEPT/PROGNOS (1996)).

In Abhängigkeit von der jeweils untersuchten Fragestellung und der Datenverfügbarkeit empfehlen sich einzelne oder mehrere der dargestellten Methoden zur Monetarisierung externer Effekte. Mit Blick auf diese Kriterien konzentrieren sich die folgenden Analysen auf die Methode der ökonomischen Bewertung der Grenzschäden sowie die Methode der Abschätzung der Grenzvermeidungskosten.

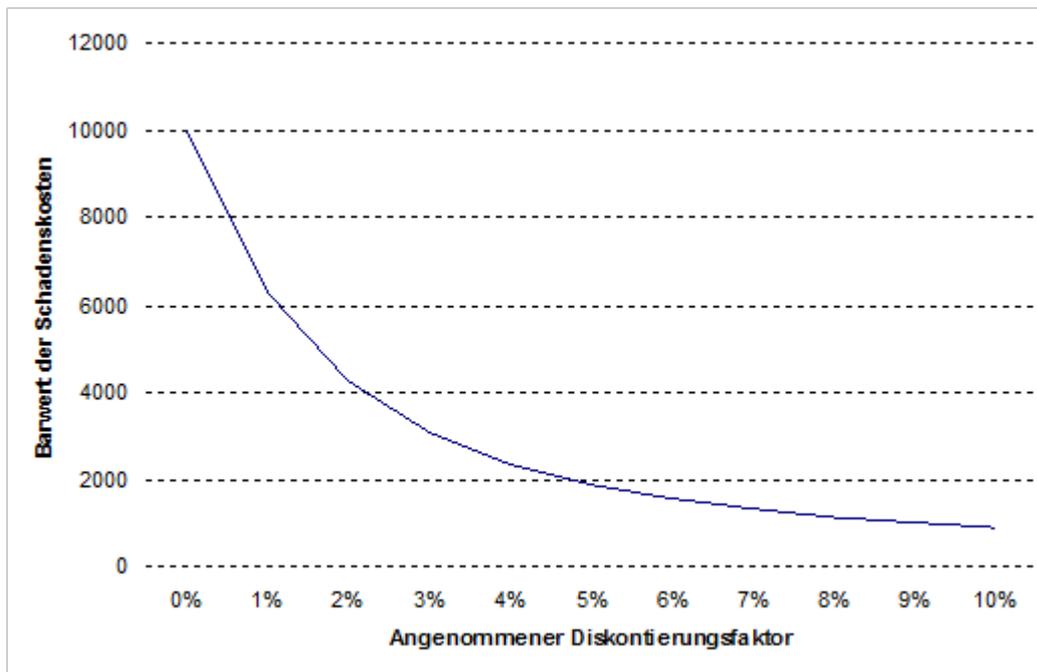
Wie oben erwähnt, ist die Monetarisierung von zusätzlichen Klimaschäden eine mögliche Herangehensweise zur monetären Bewertung der externen Effekte von Klimaschutzmaßnahmen, wobei die vermiedenen Grenzklimaschäden spiegelbildlich als zusätzlicher Nutzen von Klimaschutzmaßnahmen aufgefasst werden können. Wie schon Masuhr et al. (1992) in ihrer grundlegenden Untersuchung zu den externen Kosten der Energieversorgung sowie INFRAS/ECONCEPT/PROGNOS (1996) in einer Folgeuntersuchung zu den externen Kosten im Energie- und Verkehrsbereich gezeigt haben, stellen sich im Rahmen der Monetarisierung von Klimaschäden eine Reihe von teilweise sehr weitreichenden Fragen, die zum Teil schon moralisch-ethischen Charakter haben: Wie sind Schäden an der Gesundheit eines, mehrerer oder vieler Menschen ökonomisch zu bewerten? Wie bewertet man Todesfälle infolge des anthropogenen Klimawandels bzw. deren Vermeidung durch klimapolitische Maßnahmen? Wie kann die schleichende Reduktion der Artenvielfalt durch den Klimawandel in monetären Größen ausgedrückt werden? Hingegen lassen sich andere Fragen noch vergleichsweise einfach beantworten, so z. B. die Frage nach den Kosten für die Wiedererrichtung oder Instandsetzung von Gebäuden nach einer Überschwemmung oder einem anderen extremen Wetterereignis.

Hinzu kommt die Problematik, dass viele der Schäden, die durch klimaschädigende Aktivitäten hervorgerufen werden, in der Zukunft eintreten werden. Wie bewertet man, dass in 10, 20 oder

50 Jahren bestimmte Wetterereignisse an bestimmten oder noch zu bestimmenden Orten eintreten werden? Umgekehrt gefragt: Wie kann man die Vermeidung solcher Schäden durch klimapolitische Maßnahmen, also den Nutzen solcher Maßnahmen, ökonomisch bewerten? Auf einer mikroökonomischen Ebene sind diese Fragen noch relativ einfach zu beantworten. Hierfür genügt es, den Geldbetrag, den ein Individuum für die Beseitigung des jeweiligen (Sach)Schadens in der Zukunft aufwenden muss zu ermitteln und diesen mit einer Zinsrate für risikolose Anlageformen abzuzinsen. Auf diese Weise wird der sog. Barwert, also der heutige Wert der Zukunftsinvestition ermittelt (Grimme, 2009).

Auf makroökonomischer Ebene ist die Beantwortung solcher Fragestellung deutlich schwieriger. Jetzt stehen ethische Fragestellungen im Vordergrund, wie u. a. Tol (2005) und Grimme (2009) gezeigt haben: Wie kann der Nutzen aus den vermiedenen Umweltschäden zukünftiger Generationen im Verhältnis zum Nutzen gleicher Umweltschäden heutiger Generationen bewertet werden? Die an dieser Stelle erforderliche Festlegung hat nicht nur ethische, sondern auch unmittelbare ökonomische Aspekte. Denn auf diese Weise wird über den anzuwendenden Diskontfaktor für Umweltschäden entschieden. Nimmt man beispielsweise an, dass der Nutzen der Vermeidung von Umweltschäden bei heutigen und künftigen Generationen gleich anzusehen sein soll, führt dies dazu, dass die Schadenskosten zukünftiger Umweltschäden nicht abgezinst werden. Entsprechend fällt der Barwert der Schadenskosten bei dieser Annahmensetzung sehr hoch aus. Umgekehrt führen Annahmen über einen geringeren Nutzen künftiger Generationen im Vergleich zum Nutzen heutiger Generationen zu kleineren Barwerten der Schadenskosten. Diese Zusammenhänge veranschaulicht die nachfolgende Abbildung von Grimme (2009). Hier wurde beispielhaft eine Emissionsquelle angenommen, die jedes Jahr konstant hohe Emissionen über einen Zeitraum von 100 Jahren verursacht. Pro Jahr entstehen dabei annahmegemäß Schadenskosten in Höhe von 100 €.

Abbildung 7-10: Veränderung des Barwerts der Schadenskosten in Abhängigkeit vom
gewählten Diskontfaktor



Quelle: Grimme (2009), S. 42.

Wie die Abbildung zeigt, verändert sich der Barwert der Schadenskosten erheblich, je nachdem, in welcher Höhe der Diskontfaktor angenommen wird: Bei einem Diskontfaktor von 0 belaufen sich die gesamten Schadenskosten auf 10.000 €, hingegen bei einem Abzinsungsfaktor von 10% nur noch 900 €. Diese Bandbreite veranschaulicht die große Bedeutung, die der Setzung von Annahmen zur monetären Bewertung von Grenzschäden und Grenznutzen klimapolitischer Maßnahmen zukommt.

Alternativ oder ergänzend kann der gesellschaftliche Nutzen von klimapolitischen Maßnahmen auch mit Hilfe des oben skizzierten Vermeidungskostenansatzes in monetäre Größen überführt werden. Beim Vermeidungskostenansatz werden die eigentlichen Schadenskosten nicht näher betrachtet. Vielmehr konzentriert sich dieser Ansatz auf die Kosten, die zur Vermeidung des Schadens anzusetzen sind. Hierbei handelt es sich in der Regel um eine Grenzkostenbetrachtung: untersucht werden die Kosten, die zur Vermeidung der Emission einer zusätzlichen Einheit klimarelevanter Substanzen aufzuwenden sind. Die Emissionsvermeidung kann durch den Einsatz geeigneter Technologien, operationeller und/oder sonstiger Maßnahmen erfolgen.

Grundsätzlich zeichnet sich der Vermeidungskostenansatz durch deutlich weniger Unsicherheiten sowie durch eine geringere Komplexität im Vergleich zum Schadenskostenansatz aus. Auch

die schwer zu beantwortenden ethisch-moralischen Fragestellungen des Schadenskostenansatzes treten hier zunehmend in den Hintergrund. Allerdings ist auch der Vermeidungskostenansatz nicht unumstritten – das wohl gewichtigste Argument lautet, dass die Vermeidungskosten in unmittelbarer Beziehung zum jeweiligen Reduktionsziel bzw. zu den entsprechenden Reduktionsannahmen stehen. Dies ist deshalb von großer Bedeutung, da im Allgemeinen von überproportional ansteigenden Vermeidungskostenverläufen ausgegangen wird. Denn die Vermeidung einer weiteren Einheit eines jeweiligen Schadstoffs oder Emission wird in der Regel bei einem bereits gereinigten Umweltmedium bzw. bei einem bereits relativ niedrigen Emissionsniveau technologisch bedingt immer teurer. Entsprechend wird die Höhe der Grenzvermeidungskosten vom Reduktionsziel, von der Emissionsspezies, von der verfügbaren Reduktionstechnologie und/oder verfügbaren operationellen sowie sonstigen Maßnahmen zur Emissionsreduktion und dem jeweiligen Stand der Technik determiniert.

Insgesamt ist deutlich geworden, dass die monetäre Bewertung des Nutzens von klimapolitischen Maßnahmen ein komplexes Unterfangen ist. Dies bedeutet nicht, dass eine Monetarisierung von positiven wie negativen externen Effekten klimapolitischer oder sonstiger Maßnahmen grundsätzlich unmöglich ist. Die aufgezeigten Problembereiche und offenen Fragen müssen jedoch bei der Interpretation von Studienergebnissen zur Monetarisierung externer Effekte berücksichtigt werden.

Die nachfolgende Tabelle gibt einen Überblick über ausgewählte Literaturergebnisse zu den externen Kosten von CO₂-Emissionen bzw. CO₂-Äquivalenten. Die dort ebenfalls dargestellte Studie von CE Delft/INFRAS/Fraunhofer ISI hat explizit die externen Kosten im Verkehrssektor untersucht.

Tabelle 7-12: Überblick über Literaturergebnisse zu externen Kosten von CO₂ bzw. CO₂-Äquivalenten

Titel	Autor bzw. Hrsg.	Publikations-jahr	Externe Kosten pro Tonne CO ₂ bzw. CO ₂ -Äquiv.	Methode
External Costs of Transport in Europe	CE Delft/ INFRAS/ Fraunhofer ISI	2011	25 € (Low Szenario); 146 € (High Szenario)/t CO ₂ -Äquiv.	Vermeidungskosten- und Schadenskostenansatz
The marginal damage costs of carbon dioxide emissions: an assessment of the uncertainties	R. Tol	2005	26,5 USD/t CO ₂ (Mittelwert aller analysierten Studien)	Metastudie zu CO ₂ -Schadenskosten in der Literatur
The economics of Climate Change: The Stern Review	N. Stern	2007	22 – 61 USD/t CO ₂	Vermeidungskostenansatz; angenommen wurde Reduktion der globalen CO ₂ -Emissionen auf 18 Gigatonnen
Carbon Valuation in UK Policy Appraisal: a Revised Approach	Department of Energy and Climate Change (UK)	2009	35 – 140 GBP/t CO ₂	Vermeidungs- und Schadenskostenansatz; Ergebnisse wurden für UK ermittelt
External costs of nuclear: Greater or less than the alternatives?	A. Rabl/W. A. Rabl.	2013	8,3 – 75 €/t CO ₂ -Äquiv.	Schadenskostenansatz; gezeigte Kostenschätzungen beziehen sich auf fossile Brennstoffe

Quelle: Eigene Zusammenstellung.

Wie aus der Tabelle ersichtlich, ist die Bandbreite der Kostenschätzungen relativ groß. Den höchsten Wert hat das Department of Energy and Climate Change (2009) mit 140 GBP (etwa 215 USD in Preisen von 2012) pro t CO₂-Äquivalent abgeschätzt, der niedrigste Wert wurde von Rabl/Rabl (2013) mit 8,3 € (etwa 11,4 USD in Preisen von 2012) pro t CO₂-Äquivalent angegeben. Sicher lassen sich in der inzwischen recht umfangreichen Literatur noch Schätzungen finden, die zu weit höheren bzw. noch niedrigeren Ergebnissen kommen.

Multipliziert man die Einsparungen an klimarelevanten Emissionen im AviClim-Szenario „World“ mit den externen Kosten von 11,4 USD – 215 USD je Tonnen CO₂-Äquivalent, resultieren vermiedene externe Kosten in einer Bandbreite von 0,7 Mrd. USD (im Jahr 2010, Klimasteuer, Low Price Szenario) bis 638,8 Mrd. USD (im Jahr 2030, Emissionshandel für alle klimarelevanten Gase, High Price Szenario). Diese, durch die klimapolitischen Instrumente vermiedenen externen

Kosten können unter Berücksichtigung der oben dargestellten Einschränkungen vorsichtig als ihr möglicher gesellschaftlicher Nutzen interpretiert werden.

8 Wesentliche Ergebnisse, Empfehlungen und Ausblick

8.1 Hintergrund der Untersuchung, wesentliche Ergebnisse und Empfehlungen

Der Luftverkehr trägt zum anthropogenen Klimawandel bei. Zu den klimarelevanten Emissionen gehören neben Kohlendioxid auch Stickoxide, Schwefeloxide, Wasserdampf, Ruß, Kondensstreifen und Zirren. Seit dem Jahr 1990 ist ein kontinuierlicher Anstieg der verkehrsbedingten Kohlendioxid- (CO_2) und anderen klimarelevanten Emissionen wie Stick- (NO_x) und Schwefeloxide (SO_x), Wasserdampf (H_2O), Ruß, Kondensstreifen und Zirren zu verzeichnen (Sausen et al., 2005). Im Jahr 2005 trugen die CO_2 -Emissionen des Luftverkehrs zu etwa 1,6% zum anthropogenen Klimawandel bei. Der gesamte Klimaeffekt des Luftverkehrs, also der Beitrag der CO_2 - und der Nicht- CO_2 -Emissionen zusammen, lag im selben Jahr bei etwa 4,9% (Lee et al., 2009).

In Anbetracht des für die kommenden Jahre erwarteten kontinuierlichen Wachstums des Luftverkehrs in Höhe von 3 bis 6 % p. a. je nach Weltregion (vgl. hierzu z. B. Airbus, 2013), erscheint es dringend erforderlich, Maßnahmen zur Begrenzung der gesamten klimarelevanten Emissionen des Luftverkehrs zu ergreifen. Das vom Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) im Rahmen des Förderschwerpunktes „Ökonomie des Klimawandels“ geförderte Projekt „AviClim“ („Including Aviation in International Protocols for Climate Protection“) hat die Machbarkeit der Einbeziehung aller klimarelevanten Emissionen des Luftverkehrs in internationale Klimaschutzprotokolle und die damit verbundenen ökonomischen und ökologischen Effekte analysiert. Das Deutsche Zentrum für Luft- und Raumfahrt (DLR) e. V. hat diese Untersuchung im Zeitraum 10/2011 – 03/2015 durchgeführt.

Im Rahmen von AviClim wurden verschiedene umweltökonomische Instrumente und operationelle Maßnahmen, alternative Metriken zur Quantifizierung der Klimaeffekte insbesondere der Nicht- CO_2 -Emissionen des Luftverkehrs sowie unterschiedliche geopolitische Szenarien, die sich hinsichtlich der internationalen Umsetzung von klimaschützenden Maßnahmen unterscheiden, analysiert. Im Detail analysiert wurden die klimapolitischen Maßnahmen:

- Klimasteuer, d. h. eine Steuer auf die CO₂- und die klimarelevanten Nicht-CO₂-Emissionen des Luftverkehrs;
- NO_x-Entgelt kombiniert mit einem CO₂-Emissionshandel und einfachen operationellen Maßnahmen („Tiefer Fliegen“) zur Vermeidung von Kondensstreifen und Zirren;
- Emissionshandel für die CO₂- und die klimarelevanten Nicht-CO₂-Emissionen des Luftverkehrs.

Die einzelnen klimarelevanten Gase haben eine unterschiedliche Verweildauer in der Atmosphäre: Während CO₂ eine Lebenszeit von bis zu 100 Jahren aufweist, reicht die Lebenszeit anderer Klimagase von wenigen Stunden (lineare Kondensstreifen) bis hin zu einigen Jahren bzw. Jahrzehnten. Wenn der gesamte Klimaeffekt des Luftverkehrs mit Hilfe eines Instruments reguliert werden soll, müssen die Klimawirkungen der einzelnen Nicht-CO₂-Spezies in Relation zur Klimawirkung von CO₂ gestellt werden. Hierzu wurde im Rahmen von AviClim die Metrik ‚Average Temperatur Response (atr)‘ mit einem Zeithorizont von 20 Jahren (atr 20) sowie alternativ 50 Jahren verwendet (atr 50). Bei einem relativ kurzen Zeithorizont von 20 Jahren werden die Wirkungen der kurzlebigeren Klimagase, wie z. B. NO_x oder Kondensstreifen, stärker berücksichtigt; ein Betrachtungszeitraum von 50 Jahren erlaubt wiederum eine etwas stärkere Gewichtung der langlebigeren Klimagase, insbesondere von CO₂.

Zu den wesentlichen Ergebnissen und Empfehlungen dieses Forschungsprojektes zählen:

Klimapolitische Maßnahmen entfalten unterschiedliche Wirkungen sowohl hinsichtlich der ökonomischen als auch ökologischen Folgen. Für die Politik ist daher zunächst eine klare Definition des gewünschten Ziels hinsichtlich der zu erreichenden Reduktion der Klimaänderung und einer akzeptablen monetären Belastung des Luftfahrtsektors wichtig.

Die AviClim-Modellierungsergebnisse belegen, dass unter den getroffenen Annahmen das Instrument eines globalen Emissionshandels auf alle klimarelevanten Substanzen mit der Möglichkeit, CO₂-Zertifikate aus anderen Sektoren zu kaufen, den Instrumenten eines NO_x-Entgelts und einer Klimasteuer überlegen ist. Durch ein NO_x-Entgelt werden die NO_x-Emissionen eines Fluges preislich belastet. Zusätzlich werden bei diesem Instrument ein CO₂-Emissionshandel und operationelle Maßnahmen zur Vermeidung von Kondensstreifen und Zirren eingeführt. Durch eine Klimasteuer wiederum werden alle klimarelevanten Emissionen des Luftverkehrs mit einer Steuer belastet.

Die Untersuchungsergebnisse unterstreichen die Erkenntnisse der umweltökonomischen Theorie, die besagen, dass Emissionsrechtsmodelle sowohl zu den volkswirtschaftlich betrachtet geringsten Vermeidungskosten für Emissionen führen als auch die Umsetzung eines bestimmten ökologischen Ziels sicher gewährleisten. Gleichwohl zeigen die Erfahrungen auf internationaler Ebene, dass die Umsetzung dieser Erkenntnisse in die Praxis mit sehr großen Schwierigkeiten behaftet ist. So gestalten sich insbesondere die Verhandlungen auf der Ebene der Internationalen Zivilluftfahrtorganisation (ICAO) zur im Jahr 2013 beschlossenen Einführung eines globalen CO₂-Handelssystems für den Luftverkehr (ICAO, 2013) äußerst langwierig und schwierig.

Gründe für die Vorteilhaftigkeit des Emissionshandels im Rahmen der AviClim-Untersuchung sind einerseits die z. T. deutlich niedrigeren Gesamtkosten sowie relativ geringen Wettbewerbsverzerrungen und Rückgänge der Erwerbstätigenzahlen im Vergleich zu einer Entwicklung ohne klimapolitische Maßnahmen. Andererseits können durch den Emissionshandel signifikante Einsparungen an Klimagasen und positive Klimawirkungen realisiert werden. Beispielsweise könnte die Klimawirkung des Luftverkehrs im Jahr 2100 unter den Annahmen des ‚High Price Scenarios‘ im Szenario „World“ um bis zu 70% im Vergleich zu einer Business-as-usual-Entwicklung reduziert werden. Das ‚High Price Scenario‘ nimmt an, dass die Preise für CO₂-Äquivalente von 10 USD/t CO₂-Äquivalent im Jahr 2010 auf 80 USD/t CO₂-Äquivalent im Jahr 2030 steigen werden.

Hierbei ist zu berücksichtigen, dass diese ökologischen Effekte ganz überwiegend durch Zukäufe von Emissionsrechten von stationären Sektoren, also nicht durch Reduktionsleistungen des Luftverkehrs selbst erzielt werden. Die Zurechnung der Zukäufe zu den Einsparungen an klimarelevanten Emissionen des Luftverkehrs ist dann sachlich geboten, wenn die Nachfrage des Luftverkehrssektors nach Emissionsrechten zu zusätzlichen Reduktionsmaßnahmen und damit zu einem zusätzlichen Angebot an diesen Rechten bei anderen Teilnehmern am Emissionshandel führt. Mit Blick auf die sehr hohen zusätzlichen Vermeidungskosten des Luftverkehrssektors für klimarelevante Emissionen spricht vieles dafür, dass der Luftverkehrssektor höhere Preise für Emissionsrechte zu zahlen bereit sein wird als andere Emittentengruppen. Aufgrund dessen erscheint es plausibel, dass die Zukäufe des Luftverkehrssektors an Emissionsrechten zu zusätzlichen Emissionseinsparungen bei anderen Emittenten führen werden. Mithin ist die Zuordnung der durch die Zukäufe an Emissionsrechten erfolgten Veränderung der Klimawirkung zum Luftverkehr unter diesen Annahmen gerechtfertigt.

Eine weltweite Einführung von klimapolitischen Maßnahmen ist aus ökologischer Sicht am sinnvollsten; eine Beschränkung auf die sog. „Great Aviation Countries“ bzw. „Annex-I-Countries“

hat jedoch fast den gleichen ökologischen Nutzen. Dies liegt daran, dass in diesen geopolitischen Szenarien mehr als 90 Prozent der weltweit durchgeführten Flüge unter das jeweilige klimaschützende Instrument fallen würden. Das im Rahmen von AviClim entworfene geopolitische Szenario „Great Aviation Countries“ nimmt an, dass die wichtigsten Akteure im internationalen Luftverkehr zu den Unterstützerstaaten der jeweiligen klimapolitischen Maßnahme zählen. Hierzu gehören unter anderem: Die EU, die USA, Kanada, Südkorea, Japan, Singapur, China, Brasilien und die Golfstaaten. Im geopolitischen Szenario „Annex-I-Countries“ wird hingegen angenommen, dass alle Annex-I-Staaten plus Brasilien, Russland, Indien und China das jeweilige klimapolitische Instrument einführen werden.

Eine weltweite Einführung führt zu den geringsten Wettbewerbsverzerrungen, ist aber vermutlich politisch schwerer umzusetzen als eine Beschränkung auf „Great Aviation Countries“ oder „Annex-I-Countries“. Vor diesem Hintergrund erscheint es sinnvoll, in einer möglichst großen Zahl von Staaten rasch klimaschützende Maßnahmen im Luftverkehr einzuführen, anstatt auf eine weltweite Lösung zu warten. Aus wettbewerbspolitischer Sicht ist hierbei wichtig, dass die Staaten, aus denen die wichtigsten Fluggesellschaften der Welt stammen, bei einem solchen Ansatz von Anfang an teilnehmen. Andernfalls sind erhebliche Wettbewerbsverzerrungen im Luftverkehrsmarkt zu befürchten.

Prohibitiv hohe Preise pro CO₂-Äquivalent führen bei einer überproportional zurückgehenden Nachfrage nahezu zu einem Zusammenbruch des Luftverkehrs und damit zum Wegfall seiner positiven gesellschaftlichen und ökonomischen Effekte. Dies haben die AviClim-Modellierungsergebnisse belegt. Insbesondere die Kombination der Metrik atr 20, die die Temperaturänderung über einen Zeithorizont von 20 Jahren abschätzt, hoher Preise für CO₂-Äquivalente (z. B. 80 USD pro Tonne CO₂-Äquivalent im Jahr 2030) und einer angenommenen sehr deutlichen Nachfragereaktion (Preiselastizität von -2,1), die zu einer überproportional zurückgehenden Luftverkehrsnachfrage führt, wirkt sich sehr ungünstig auf die Umsätze, die Beschäftigung und die Luftverkehrsentwicklung aus. So würde unter diesen Annahmen die Beschäftigung (direkte und indirekte Effekte) im Weltluftverkehr von knapp 8 Millionen Beschäftigten in der Business-as-usual-Entwicklung im Jahr 2030 auf nur noch 359.000 Beschäftigte zurückgehen. Unter der Annahme der Metrik atr 50, die die Temperaturänderung für einen Zeithorizont von 50 Jahren abschätzt, und von niedrigeren Preisen für CO₂-Äquivalente ist dies nicht der Fall. Hier ist die Politik aufgefordert, durch die Setzung von Rahmenbedingungen eine sowohl aus ökologischer als auch aus ökonomischer und sozialer Sicht nachhaltige Entwicklung im Luftverkehr zu gewährleisten.

8.2 Ausblick

Im Sinne eines Ausblicks können folgende Überlegungen, die über die im Rahmen von AviClim durchgeführten Untersuchungen hinausgehen, festgehalten werden:

Aus klimapolitischer Sicht ist die im Rahmen der 38. ICAO Versammlung im Jahr 2013 vereinbarte Einführung einer marktbasierten Maßnahme (MBM) zur Limitierung der CO₂-Emissionen des internationalen Luftverkehrs bis zum Jahr 2020 (ICAO, 2013) ein wichtiges Ziel. Sowohl Emissionshandelssysteme als auch die zur Zeit intensiv diskutierten Offsetting-Systeme sind hierbei prinzipiell geeignet. Parallel dazu sollten Maßnahmen für Nicht-CO₂-Effekte weiter entwickelt werden. Idealerweise lassen sich Maßnahmen für CO₂ auf Nicht-CO₂-Effekte ausweiten. Hierzu könnten die Erkenntnisse aus AviClim genutzt werden. Diese können sowohl auf CO₂-Emissionshandelssysteme als auch auf CO₂-Offsetting-Systeme übertragen werden.

Bei Vorhandensein einer marktbasierten Maßnahme zur Berücksichtigung der CO₂- und Nicht-CO₂-Effekte ist es sinnvoll, die Klimawirkung jedes Einzelfluges zu berechnen. Dadurch könnten auch Anreize zur Reduktion der Klimawirkung mit Hilfe technischer Maßnahmen (niedrigere spezifische Emissionen) und operationeller Maßnahmen (z. B. dreidimensionale klimaoptimierte Flugroutenplanung) ausgelöst werden.

Aus wissenschaftlicher Sicht kann folgender Ausblick formuliert werden:

Die hier durchgeführten gesamtwirtschaftlichen Analysen zu den Beschäftigungseffekten stellen nur einen Ausschnitt der volkswirtschaftlichen Effekte der klimapolitischen Instrumente dar. Weiterführende Analysen sollten sich u. a. auf gesamtwirtschaftliche Wachstumseffekte (über den Luftverkehrssektor hinaus) beziehen.

In weiteren Analysen sollten auch die positiven gesellschaftlichen Effekte des Luftverkehrs untersucht werden, wie z. B. Befriedigung der Nachfrage nach weltweiter schneller Mobilität oder Unterstützung des globalen Handels.

Flugzeuge werden überwiegend in Reiseflughöhen betrieben. Um die klimarelevante Effekte des Luftverkehrs besser abbilden zu können, muss das Emissionsverhalten von Flugzeugtriebwerken in Reiseflughöhen insbesondere für neue Brennkammertechnologien (bspw. gestufte Brenn-

kammern) besser bekannt sein. Hierzu ist es erstrebenswert, weitere Lastpunkte in die ICAO-Zertifizierungsvorschriften mit aufzunehmen.

Die Luftfahrtindustrie plant mittelfristig den Einsatz alternativer (nachhaltiger) Brennstoffe zur Reduzierung der Emissionen bzw. der Klimawirkung des Luftverkehrs. Die ökologischen und ökonomischen Auswirkungen einer zunehmenden Nutzung dieser Brennstoffe bzw. eine Analyse der Effekte möglicher Reduktionsinstrumente auf die Nutzung alternativer Brennstoffe im Luftverkehr wäre daher von großem wissenschaftlichen Interesse und sollte in zukünftigen Forschungsprojekten mit adressiert werden.

Ebenfalls sollte in weiteren wissenschaftlichen Untersuchungen analysiert werden, welche ökologischen Verbesserungen zu realisieren wären, wenn die Fluggesellschaften die jeweils „besten“ Flugzeuge der Flugzeugklasse einsetzen würden. Hierzu müssten mehrdimensionale Emissionsberechnungen durchgeführt werden.

Die im Projekt AviClim durchgeführten Studien sind ein erster Schritt, um die ökonomischen und ökologischen Effekte von klimapolitischen Maßnahmen zu untersuchen. Allerdings wird in der Studie vereinfachend angenommen, dass die Luftverkehrsindustrie nur durch Entrichten der Steuern/Entgelte bzw. dem Erwerb der Zertifikate oder durch Verringerung der Flugleistung auf die Maßnahmen reagieren kann, während davon ausgegangen wird, dass andere Sektoren durch neue Technologien ökologische Einsparungen erzielen. Für eine umfassende Beurteilung der Wirkung von klimapolitischen Maßnahmen müsste eine erweiterte Studie durchgeführt werden, bei der auch die Luftverkehrsindustrie mit neuen Flugzeug- und Triebwerkstechnologien oder veränderten Flugrouten auf die Maßnahmen reagieren kann. Insbesondere in der langen Frist dürfte die zunehmende Nutzung neuer Flugzeug- und Triebwerkstechnologien eine realistische Option sein.

Die Nicht-CO₂-Effekte des Luftverkehrs auf das Klima sollten genauer quantifiziert werden (einschließlich der Konfidenzintervalle), um die verbleibenden Unsicherheiten bei der Berechnung von CO₂-Äquivalenten zu reduzieren.

Schließlich sollte der Zusammenhang zwischen der (politischen) Zielsetzung hinsichtlich der Reduzierung der Klimawirkung und der Wahl der Metrik weitergehend analysiert werden.

Literatur

ACESA (American Clean Energy and Security Act of 2009) (2009), 'Waxman-Markey Bill'

<http://www.c2es.org/federal/congress/111/acesa>

Airbus (2010), Global Market Forecast 2010-2029, Presentation by John Leahy, Toulouse, December 2010.

Airbus (2011), Global Market Forecast 2011-2030, Blagnac Cedex.

Airbus (2012), Global Market Forecast 2012-2031, Blagnac Cedex.

Airline Business (2009-2013) Top 200 Passenger Operations Ranked by Traffic – 2009, 2010, 2011, 2012 und 2013.

Anger, A., Köhler, J. (2010) Including aviation emissions into the EU ETS: Much ado about nothing? A review. *Transport Policy*, (17), S. 38-46.

ASCEND Advisory (ASCEND verschiedene Jahrgänge) Aircraft & Airline Data, New York.

ASCEND Worldwide Limited (2011), ASCEND Online Fleets, Online Database Product obtained from 2008 to 2011, www.ascendworldwide.com.

Böhringer, C., Lange, A. (2012), Der europäische Emissionszertifikatehandel: Bestandsaufnahme und Perspektiven, in: *Wirtschaftsdienst 2012, Sonderheft, ZBW – Leibniz-Informationszentrum Wirtschaft*.

Boucher, O. und Reddy, M. (2008), Climate trade-off between black carbon and carbon dioxide emissions. *Energy Policy* 36 (1), S. 193 – 200.

Brösse, U. (1992), *Allgemeine Volkswirtschaftslehre (Mikroökonomie)*. 6 überarbeitete und ergänzte Auflage, Aachen.

Burkhardt, U. und Kärcher, B. (2011), Global radiative forcing from contrail cirrus. *Nature Climate Change* (1), S. 54–58.

CE Delft (2005), Giving wings to emissions trading. Inclusion of aviation under the European emission trading system (ETS): design and impacts. Report for the European Commission, Delft.

CE Delft (2008), Lower NO_x at Higher Altitudes. Policies to Reduce the Climate Impact of Aviation NO_x Emission. Report, Delft.

CE Delft/INFRAS/Fraunhofer ISI (2011) External Costs of Transport in Europe – Update Study for 2008. Delft, November 2011.

Conrady, R., Fichert, F., Sterzenbach, R. (2013) Luftverkehr, Betriebswirtschaftliches Lehr- und Handbuch, 5., vollständig überarbeitete Auflage, München.

Council of the European Union (2009a), Directive 2008/101/EC of the European Parliament and the Council of 19 November 2008 amending Directive 2003/87/EC so as to include aviation activities in the scheme for greenhouse gas emission allowance trading within the Community. *Official Journal of the European Union*, L 8/3, Brussels, 13 January 2009.

Council of the European Union (2009b), Directive 2009/29/EC of the European Parliament and of the Council amending Directive 2003/87/EC so as to improve and extend the greenhouse gas emission allowance trading system of the Community. *Official Journal of the European Union*, Brussels, 5 June 2009.

Civil air navigation services organization CANSO (2008), ATM Global Environment Efficiency Goals for 2050, Hoofddorp (NL).

Cooper, A.; Smith, P. (2005), The Economic Catalytic Effects of Air Transport in Europe, Studie des Oxford Economic Forecasting im Auftrag von EUROCONTROL.

Dahlmann, K. (2012), Eine Methode zur effizienten Bewertung von Maßnahmen zur Klimaoptimierung des Luftverkehrs. DLR Forschungsbericht 2012-05, Köln.

Dales, J. H., (1968), *Pollution, Property and Prices*. Toronto.

Department of Energy and Climate Change (2009) Carbon Valuation in UK Policy Appraisal: a Revised Approach. Climate Change Economics, London.

Derigs, U., Illing, S. (2013) Does EU ETS instigate Air Cargo network reconfiguration? A model-based analysis. European Journal of Operational Research (225), S. 518-527.

Embraer S.A. (2011), Embraer Market Outlook 2011-2030, www.embraer.com.br.

EUROCONTROL Experimental Centre (2011), User Manual for the Base of Aircraft Data (BADA) Revision 3.9. EEC Technical/Scientific Report No. 11/03/08-08, Brétigny-sur-Orge CEDEX.

Euronews (2009), Sudan compares climate deal to the Holocaust,
<http://www.euronews.com/2009/12/19/sudan-compares-climate-deal-to-the-holocaust/> retrieved 16 July, 2012.

European Commission (2008): The 2°C target, Information Reference Document, Bruxelles.

European Commission (2013): World Input-Output Database, Bruxelles.

Eurostat (verschiedene Jahrgänge): Volkswirtschaftliche Gesamtrechnungen. Luxembourg.

Eyers, C. J., Norman, P., Middel, J., Plohr, M., Michot, S., Atkinson, K., Christeou, R. A. (2004), AERO2k Global Aviation Emissions Inventories for 2002 and 2025. QinetiQ Ltd, Farnborough (UK).

Fichter, C., Marquart, S., Sausen, R., Lee, D.S. (2009), The impact of cruise altitude on contrails and related radiative forcing. Meteorologische Zeitschrift, (14), S. 563 – 572.

Fichter, C. (2009), Climate Impact of Air Traffic Emissions in Dependency of the Emission Location. DLR-Forschungsbericht 2009-22, Köln.

Forster, P. M. d. F., Shine, K. P. und Stuber, N. (2006), It is premature to include non-CO₂ effects of aviation in emission trading schemes. Atmospheric Environment 40 (6), S. 1117 – 1121.

Forsyth, P. (2010), The Impact of Climate Change Policies on Airline Fares, Profitability and Emissions. Monash University, Australia.

Fridström, L., Thune-Larsen, H. (1989), An econometric air travel demand model for the entire conventional domestic network: the case of Norway. *Transportation Research B* (23), S. 213-224.

Fuglestad, J. S., Berntsen, T. K., Godal, O., Sausen, R., Shine, K. P. und Skodvin, T. (2003), Metrics of climate change: Assessing radiative forcing and emission indices. *Climatic Change* (58), S. 267–331.

Fuglestad, J. S., Berntsen, T. K., Myhre, G., Rypdal, K. und Skeie, R. B. (2008), Climate forcing from the transport sectors. *PNAS* (105), S. 454–458.

Fuglestad, J. S., Isaksen, I. S. A. und Wang, W.-C. (1996), Estimates of indirect global warming potentials for CH₄, CO and NO_x'. *Climatic Change* (34), S. 405–437.

Fuglestad, J. S., Shine, K. P., Berntsen, T. K., Cook, J., Lee, D. S., Stenke, A., Skeie, R. B., Velders, G. J. M. und Waitz, I. A. (2010), Transport impacts on atmosphere and climate: Metrics. *Atmospheric Environment* 44 (37), S. 4648 – 4677.

Gierens, K. M. (2008), Contrails: Their atmospheric impact and mitigation strategies. In: *Towards Sustainable Aviation Propulsion, 2008-11-19*, Bristol (UK).

Gillen, D., Morrison, W. G., Stewart, M. A. (2004), Air Travel Demand Elasticities: Concepts, Issues & Measurement. Study commissioned by the Department of Finance, Ottawa.

Gillett, N. P. und Matthews, H. D. (2010), Accounting for carbon cycle feedbacks in a comparison of the global warming effects of greenhouse gases. *Environ. Res. Lett.* 5 (3), 034011.

Grewe, V. and Stenke, A. (2008), AirClim: an efficient climate impact assessment tool. *Atmos. Chem. and Phys.* (8), S. 4621–4639.

Grimme, W. (2009), Modellierung lärm- und emissionsreduzierender Maßnahmen im Luftverkehr - Zwischenbericht. Projektbericht, Köln (vertraulich).

Haag, K.-H. (2013), Leiter der Umweltkonzepte des Lufthansakonzerens, Persönliche Kommunikation am 22.08.2013 in Köln-Porz anlässlich des gemeinsamen Gedankenaustausches im Institut für Flughafenwesen und Luftverkehr des DLR.

Hansen, J., Johnson, D., Lacis, A., Lebedeff, S., Lee, P., Rind, D. und Russell, G. (1981), Climate Impact of Increasing Atmospheric Carbon Dioxide. *Science* (213), S. 957–966.

Hansen, J., Sato, M., Ruedy, R., Nazarenko, L., Lacis, A., Schmidt, G. A., Russell, G., Aleinov, I., Bauer, M., Bauer, S., Bell, N., Cairns, B., Canuto, V., Chandler, M., Cheng, Y., Genio, D. A., Faluvegi, G., Fleming, E., Friend, A., Hall, T., Jackman, C., Kelley, M., Kiang, N., Koch, D., Lean, J., Lerner, J., Lo, K., Menon, S., Miller, R., Minnis, P., Novakov, T., Oinas, V., Perlwitz, J., Perlwitz, J., Rind, D., Romanou, A., Shindell, D., Stone, P., Sun, S., Tausnev, N., Thresher, D., Wielicki, B., Wong, T., Yao, M. und Zhang, S. (2005), Efficacy of Climate Forcings. *Journal of Geophysical Research* 110.

Houghton, J. T., Jenkins, G. J. und Ephraums, J. J. e. (1990), *Climate Change: the IPCC Scientific Assessment*. Cambridge University Press, Cambridge, UK.

IATA (International Air Transport Association) (2014), IATA Platts Jet Fuel Site: <http://www.platts.com/jetfuel>

INFRAS/ECONCEPT/PROGNOS (1996) *Die vergessenen Milliarden. Externe Kosten im Energie- und Verkehrsbereich*. Bern Stuttgart Wien, 1996.

International Civil Air Transport Organisation ICAO (2007), Resolution A36. Montreal.

International Civil Aviation Organization ICAO/Committee on Aviation Environmental Protection CAEP (2009a), *Environmental Goals Assessment*. CAEP/8-IP/8, Montreal.

International Civil Air Transport Organisation ICAO (2009b), *ICAO Annual Report of the Council*. Montreal.

International Civil Air Transport Organisation ICAO (2010a), *ICAO Annual Report of the Council*. Montreal.

International Civil Air Transport Organisation ICAO (2010b), Resolution A37. Montreal.

International Civil Aviation Organisation ICAO (2010c), Environmental Report 2010. Montreal.

International Civil Air Transport Organisation ICAO (2011), ICAO Annual Report of the Council. Montreal.

International Civil Air Transport Organisation ICAO (2013), Resolution A38. Montreal.

IVL Swedish Environmental Research Institute Ltd. (2007), Greenhouse Gas Emissions Trading for the Transport Sector. IVL Report B1703, Stockholm.

IPCC (1999), Aviation and the Global Atmosphere. University Press, Cambridge.

IPCC (2007), Climate Change 2007: The physical science basis. Cambridge University Press, New York, USA.

Joshi, M., Shine, K., Ponater, M. und Stuber, N. (2003), A comparison of climate response to different radiative forcings in the general circulation models: toward an improved metric of climate change. *Clim. Dyn.* (20), S. 843–854.

Klophaus, R. (2010), Economic Importance of Night Flying in Germany. Gemeinsame Studie mit Intraplan Consult im Auftrag der ADV (Arbeitsgemeinschaft Deutscher Verkehrsflughäfen) und des BDF (Bundesverband der Deutschen Fluggesellschaften), Berlin.

Koch, A., Lührs, B., Dahlem, F., Lau, A., Linke, F., Dahlmann, K., Gollnick, V., Schumann, U. (2012), Studies on the climate impact mitigation potential of actual and future air traffic. An integrated cost-benefit assessment applying the CATS simulation approach. Conference Paper, 16. ATRS World Conference in Tainan, Taiwan, 27-30. Juni, 2012.

Lacis, A., Wuebbles, D. J. und Logen, J. A. (1990), Radiative forcing of climate by changes in vertical distribution of ozone. *J. Geophys. Res.* (95), S. 9971–9981.

Lee, D.S., D.W. Fahey, P.M. Forster, P.J. Newton, R.C.N. Wit, L.L. Lim, B. Owen, and R. Sausen (2009), Aviation and global climate change in the 21st century. *Atmospheric Environment* (43), S. 3520–3537.

Lu, C. (2009), The implications of environmental costs on air passenger demand for different airline business models. *Journal of Air Transport Management* (15), S. 158-165.

Malina, R., McConnachie, D., Winchester, N., Wollersheim, Ch., Paltsev, S., Waitz, I. A. (2012), The impact of the European Union emissions trading scheme on US aviation. *Journal of Air Transport Management* (19), S. 36-41.

Marais, K., Lukachko, S. P., Jun, M., Mahashabde, A. und Waitz, I. A. (2008), Assessing the impact of aviation on climate. *Meteorologische Zeitschrift* (17), S. 157–172.

Masuhr, K. P., Wolff, Heimfried und Keppler, Jan (1992) Die externen Kosten der Energieversorgung. Hrsg. PROGNOSE AG. Stuttgart, 1992.

Michaelis, P., (1996), Ökonomische Instrumente in der Umweltpolitik: Eine anwendungsorientierte Einführung. *Physica-Lehrbücher*, Heidelberg.

Morell, P. (2011), *Moving Boxes by Air – The Economics of International Air Cargo*, Farnham.

MPD Group (2005), *Assessing the Economic Costs of Night Flight Restrictions*, Final Report. Studie im Auftrag der Europäischen Kommission, Brüssel.

Nairn, R. J., Hooper, P. (1992), *Tourism Related Movement Study*. Final Report on behalf of the Roads and Traffic Authority. University of New South Wales, Sydney.

OAG Aviation Solutions (2000ff.), *OAG MAX flight schedules* on CD-ROM, monthly editions covering the years 2000 and 2003-2010. www.oag.com.

OECD (2006), *The Political Economy of Environmentally Related Taxes*. Paris 2006.

OECD (2010), *Taxation, Innovation and the Environment*. Paris 2010.

O'Neill, B. C. (2000), The jury is still out on global warming potentials. *Climatic Change* (44), S. 427–443.

Oum, T. H., Gillen, D. W., Noble, S. E., (1986), Demand for fare classes and pricing in airline markets. *Logistics and Transportation Review* (22), S. 195-222.

Oum, T. H., Waters, W. G., Yong, J. S. (1990), A survey of recent estimates of price elasticities of demand for transport. *World Bank Working Papers*, WPS 359, Washington.

Oum, T. H., Waters, W. G., Yong, J. S. (1992), Concepts of price elasticities of transport demand and recent empirical estimates. *Journal of Transport Economics and Policy* (26), S. 139-154.

PriceWaterhouseCoopers (PwC) (2005), *Aviation Emissions and Policy Instruments*. Final Report on behalf of the European Commission, 23 September 2005, Brüssel.

Pompl, W. (2007) *Luftverkehr. Eine ökonomische und politische Einführung*, fünfte, überarbeitete Auflage, Berlin Heidelberg New York.

Rabl, A., Rabl, V. A. (2013) External cost of nuclear: Greater or less than the alternatives? *Energy Policy* (57), S. 575-584.

Ramanathan, V. (1987), The role of earth radiation budget studies in climate and general. *J. Geophy. Res.* (92), S. 4075–4096.

Ramaswamy, V., Boucher, O., Haigh, J., Hauglustaine, D., Haywood, J., Myhre, G., Nakajima, T., Shi, G. Y., Solomon, S., Betts, R. und et al. (2001), Radiative forcing of climate change. In: F. Joos und J. Srinivasan, (eds.), 'Climate Change 2001: The Scientific Basis. Contribution of Working Group I to the Third Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change'. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, USA.

Rotmans, J. und Den Elzen, M. G. J. (1992), A model-based approach to the calculation of global warming potentials (GWP). *International Journal of Climatology* 12 (8), S. 865–874.

Sausen, R., I. Isaksen, V. Grewe, D. Hauglustaine, D.S. Lee, G. Myhre, M.O. Köhler, G. Pitari, U. Schumann, F. Stordal and C. Zerefos (2005), Aviation radiative forcing in 2000: An update on IPCC (1999). *Meteorologische Zeitschrift* (14), S. 555-561.

Schaefer, Martin (2012), Development of a Forecast Model for Global Air Traffic Emissions. DLR Forschungsbericht 2012-08, Köln.

Scheelhaase, J. (1994), Abgaben und Zertifikate als Instrumente zur CO₂-Reduktion in der EG – Ausgestaltung und regionalwirtschaftliche Wirkungen. Ifo-Studien zur Umweltökonomie 19. München.

Scheelhaase, J., Grimme, W., Schaefer, M. (2010), The inclusion of aviation into the EU emission trading scheme – Impacts on competition between European and non-European network airlines. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, (15), S. 14-25.

Scheelhaase, J. (2011), Competitive distortions in the air transport market as a result of the upcoming worldwide emissions trading systems? *Airlines - International Magazine for Students and Professionals of Aviation*, e-zine edition (49), S. 1-5.

Scheelhaase, J. (2010), Local emission charges – A new economic instruments at German airports. *Journal of Air Transport Management (JATM)*, (16), S. 94-99.

Scheelhaase, J., Schaefer, M., Grimme, W., Maertens, S. (2012), Cost impacts of the inclusion of air transport into the European emissions trading scheme in the time period 2012-2020. *European Journal of Transport and Infrastructure Research (EJTIR)*, Issue 12(4), 2012, S. 332-348.

Scheelhaase, J. (2014), International and National Political Regulations of Aviation's Climate Impact and Cost Impacts on Air Freight, in: *Advances in Airline Economics*, Volume 4, edited by J. Peoples. Bingley, United Kingdom, S. 255-280.

Schumann, U. (1996), On conditions for contrail formation from aircraft exhausts. *Meteorologische Zeitschrift* (5), S. 4-23.

Schumann, U. (2000), Influence of propulsion efficiency on contrail formation. *Aerospheric Science Technology* (4), S. 391-401.

Schwartz, E. und Kroo, I. M. (2011), Metric for comparing lifetime averaged climate impact of aircraft. AIAA Journal 49-8.

Shine, K. (2009), The global warming potential - the need for an interdisciplinary retrieval. Climatic Change (96), S. 467–472.

Shine, K., Fuglestvedt, J. S., Hailemariam, K. und Stuber, N. (2005), Alternatives to the global warming potential for comparing climate impacts of emissions of greenhouse gases. Climatic Change (68), S. 281–302.

Siebert, H. (1976), Analyse der Instrumente der Umweltpolitik, Göttingen.

Smith, S. J. und Wigley, M. L. (2000), Global warming potentials: 1. climatic implications of emissions reductions. Climatic Change (44), S. 445–457.

Statistisches Bundesamt (2010): Input-Output-Rechnung im Überblick, Wiesbaden.

Stern, N. (2007), The Economics of Climate Change: The Stern Review, Cambridge University Press, Cambridge, 2007.

Sutkus D. J. Jr., Baughcum S. L., DuBois D. P. (2003), Commercial Aircraft Emission Scenario for 2020: Database Development and Analysis, NASA/CR-2003-212331, Hanover, MD 21076 (USA).

Tol, Richard (2005) The marginal damage costs of carbon dioxide emissions: an assessment of the uncertainties. Energy Policy 33, S. 2064-2074.

Tol, R. S. J., Berntsen, T. K., O'Neill, B. C., Fuglestvedt, J. S., Shine, K. P., Balkanski, Y. und Makra, L. (2008), Metrics for aggregating the climate effect of different emissions: A unifying framework. Papers WP257, Economic and Social Research Institute (ESRI).

UNFCCC (1998), Kyoto Protocol to the United Nations Framework Convention on Climate Change, Kyoto.

United Nations Statistical Division (UNSD verschiedene Jahrgänge): UNSD Statistical Databases, New York.

Williams, V., Noland, R., Toumi, R. (2002), Reducing the climate change impacts of aviation by restricting cruise altitudes, in: Transportation Research Part D: Transport and Environment (7), S. 451-464.

Williams, V., Noland, R., Toumi, R. (2003), Air transport cruise altitude restrictions to minimize contrail formation. Climate Policy (3), S. 207-219.

Williams, V., Noland, R. (2005), Variability of contrail formation conditions and the implications for policies to reduce the climate impacts of aviation. Transport Research Part D (10), S. 269 – 280.

Wuebbles, D., Forster, P., Rogers, H. und Herman, R. (2010), Issues and Uncertainties Affecting Metrics for Aviation Impacts on Climate. Bull. Amer. Meteorol. Soc. (91), S. 491–496.

Anhang

Tabelle A-1: CO₂-Äquivalente ohne (links) und mit operationellen Maßnahmen (rechts), ohne Verminderung der Verkehrsleistung

Szenario	Metrik	Jahr	co2	Cont	H2O	NOx	Total	Szenario	Metrik	Jahr	co2	Cont	H2O	NOx	Total
Greater Europe	atr20	2010	202	569	64	657	1493	Greater Europe	atr20	2010	211	573	52	633	1470
Greater Europe	atr20	2015	251	706	85	858	1900	Greater Europe	atr20	2015	263	712	70	829	1874
Greater Europe	atr20	2020	298	853	105	1049	2304	Greater Europe	atr20	2020	312	857	87	1008	2263
Greater Europe	atr20	2025	338	980	123	1176	2617	Greater Europe	atr20	2025	355	985	102	1133	2574
Greater Europe	atr20	2030	385	1136	144	1292	2957	Greater Europe	atr20	2030	404	1140	119	1245	2909
Greater Europe	atr50	2010	202	259	29	237	728	Greater Europe	atr50	2010	211	261	24	222	718
Greater Europe	atr50	2015	251	321	39	314	924	Greater Europe	atr50	2015	263	324	32	294	914
Greater Europe	atr50	2020	298	388	48	386	1120	Greater Europe	atr50	2020	312	390	40	360	1102
Greater Europe	atr50	2025	338	446	56	434	1274	Greater Europe	atr50	2025	355	448	46	407	1256
Greater Europe	atr50	2030	385	517	65	478	1446	Greater Europe	atr50	2030	404	519	54	448	1426
Great Aviation Countries	atr20	2010	535	1646	149	1609	3939	Great Aviation Countries	atr20	2010	539	1553	119	1518	3729
Great Aviation Countries	atr20	2015	684	2103	211	2149	5147	Great Aviation Countries	atr20	2015	690	1988	169	2024	4871
Great Aviation Countries	atr20	2020	829	2576	265	2670	6340	Great Aviation Countries	atr20	2020	837	2440	212	2515	6005
Great Aviation Countries	atr20	2025	953	2988	312	3035	7288	Great Aviation Countries	atr20	2025	962	2831	250	2857	6900
Great Aviation Countries	atr20	2030	1103	3507	368	3394	8372	Great Aviation Countries	atr20	2030	1113	3319	296	3192	7920
Great Aviation Countries	atr50	2010	535	749	71	569	1924	Great Aviation Countries	atr50	2010	539	707	56	523	1825
Great Aviation Countries	atr50	2015	684	957	96	768	2505	Great Aviation Countries	atr50	2015	690	905	77	705	2377
Great Aviation Countries	atr50	2020	829	1172	121	959	3082	Great Aviation Countries	atr50	2020	837	1111	97	881	2925
Great Aviation Countries	atr50	2025	953	1360	142	1095	3549	Great Aviation Countries	atr50	2025	962	1289	114	1005	3369
Great Aviation Countries	atr50	2030	1103	1596	168	1225	4092	Great Aviation Countries	atr50	2030	1113	1511	135	1124	3882
Annex-I-Countries	atr20	2010	520	1610	150	1552	3832	Annex-I-Countries	atr20	2010	525	1518	119	1466	3628
Annex-I-Countries	atr20	2015	663	2051	202	2065	4980	Annex-I-Countries	atr20	2015	669	1937	161	1946	4713
Annex-I-Countries	atr20	2020	801	2507	253	2559	6120	Annex-I-Countries	atr20	2020	810	2373	203	2414	5799
Annex-I-Countries	atr20	2025	919	2904	298	2904	7026	Annex-I-Countries	atr20	2025	929	2749	239	2738	6654
Annex-I-Countries	atr20	2030	1062	3403	351	3239	8054	Annex-I-Countries	atr20	2030	1073	3219	281	3051	7624
Annex-I-Countries	atr50	2010	520	733	68	548	1869	Annex-I-Countries	atr50	2010	525	691	54	504	1774
Annex-I-Countries	atr50	2015	663	933	92	737	2425	Annex-I-Countries	atr50	2015	669	881	73	677	2300
Annex-I-Countries	atr50	2020	801	1141	115	919	2976	Annex-I-Countries	atr50	2020	810	1080	92	844	2826
Annex-I-Countries	atr50	2025	919	1322	136	1046	3423	Annex-I-Countries	atr50	2025	929	1251	109	961	3250
Annex-I-Countries	atr50	2030	1062	1549	160	1168	3938	Annex-I-Countries	atr50	2030	1073	1465	128	1072	3738
World	atr20	2010	589	1798	167	1736	4290	World	atr20	2010	595	1702	133	1647	4077
World	atr20	2015	757	2314	228	2329	5627	World	atr20	2015	764	2193	183	2204	5345
World	atr20	2020	921	2847	287	2900	6955	World	atr20	2020	929	2702	231	2741	6603
World	atr20	2025	1060	3316	338	3300	8015	World	atr20	2025	1070	3147	273	3118	7608
World	atr20	2030	1230	3906	400	3695	9231	World	atr20	2030	1242	3707	322	3490	8761
World	atr50	2010	589	818	76	610	2093	World	atr50	2010	595	774	61	564	1994
World	atr50	2015	757	1053	104	827	2740	World	atr50	2015	764	998	83	764	2609
World	atr50	2020	921	1296	130	1034	3382	World	atr50	2020	929	1230	105	954	3219
World	atr50	2025	1060	1509	154	1181	3905	World	atr50	2025	1070	1432	124	1090	3716
World	atr50	2030	1230	1778	182	1324	4514	World	atr50	2030	1242	1687	147	1221	4297

Quelle: Eigene Berechnungen.

Tabelle A-2: Durch Maßnahmen reduzierte CO₂-Äquivalente (1)

Maßnahme	Szenario	Metric	Preis	Elastizität	Jahr	CO2	Cont	H2O	NOx	GesamtOhneZukauf	Zukauf	GesamtMitZukauf	Maßnahme	Szenario	Metric	Preis	Elastizität	Jahr	CO2	Cont	H2O	NOx	GesamtOhneZukauf	Zukauf	GesamtMitZukauf
Emissionshandel	Annex+Countries	ATR20 High Price	2012	2010	585	1783	165	1722	4255	566	3698	3698	Emissionshandel	Great Aviation Countries	ATR20 High Price	2012	2010	585	1783	165	1722	4255	581	3673	3673
Emissionshandel	Annex+Countries	ATR20 High Price	2015	2015	725	2215	218	2230	5388	1588	3800	3800	Emissionshandel	Great Aviation Countries	ATR20 High Price	2015	2015	724	2212	217	2225	5378	1658	3721	3721
Emissionshandel	Annex+Countries	ATR20 High Price	2020	2020	843	2604	262	2651	6360	2572	3788	3788	Emissionshandel	Great Aviation Countries	ATR20 High Price	2020	2020	840	2595	261	2639	6355	2690	3644	3644
Emissionshandel	Annex+Countries	ATR20 High Price	2025	2025	922	2880	293	2863	6958	3338	3620	3620	Emissionshandel	Great Aviation Countries	ATR20 High Price	2025	2025	916	2864	291	2841	6911	3491	3420	3420
Emissionshandel	Annex+Countries	ATR20 High Price	2030	2030	1013	3213	328	3035	7590	4267	3323	3323	Emissionshandel	Great Aviation Countries	ATR20 High Price	2030	2030	1004	3188	324	3000	7516	4466	3050	3050
Emissionshandel	Annex+Countries	ATR20 High Price	2010	2010	587	1815	176	1607	4085	277	1808	1808	Emissionshandel	Great Aviation Countries	ATR20 High Price	2010	2010	587	1815	176	1607	4085	284	1800	1800
Emissionshandel	Annex+Countries	ATR20 High Price	2015	2015	742	2031	101	809	2683	778	1905	1905	Emissionshandel	Great Aviation Countries	ATR20 High Price	2015	2015	741	2030	101	808	2681	810	1872	1872
Emissionshandel	Annex+Countries	ATR20 High Price	2020	2020	883	1242	125	991	3240	1262	1978	1978	Emissionshandel	Great Aviation Countries	ATR20 High Price	2020	2020	881	1240	125	989	3234	1317	1917	1917
Emissionshandel	Annex+Countries	ATR20 High Price	2025	2025	922	1411	144	1104	3651	1649	2001	2001	Emissionshandel	Great Aviation Countries	ATR20 High Price	2025	2025	922	1411	144	1104	3640	1722	1918	1918
Emissionshandel	Annex+Countries	ATR20 High Price	2030	2030	1123	1621	166	1206	4115	2122	1994	1994	Emissionshandel	Great Aviation Countries	ATR20 High Price	2030	2030	1118	1615	165	1200	4098	2217	1880	1880
Emissionshandel	Annex+Countries	ATR20 High Price	2010	2010	577	1760	163	1699	4199	566	3633	3633	Emissionshandel	Great Aviation Countries	ATR20 High Price	2010	2010	577	1759	163	1698	4199	581	3615	3615
Emissionshandel	Annex+Countries	ATR20 High Price	2015	2015	673	2055	202	2069	5000	1588	3411	3411	Emissionshandel	Great Aviation Countries	ATR20 High Price	2015	2015	670	2047	201	2056	4974	1658	3317	3317
Emissionshandel	Annex+Countries	ATR20 High Price	2020	2020	716	2209	222	2247	5394	2572	2822	2822	Emissionshandel	Great Aviation Countries	ATR20 High Price	2020	2020	708	2186	219	2215	5327	2690	2837	2837
Emissionshandel	Annex+Countries	ATR20 High Price	2025	2025	696	2469	221	2153	5339	3338	1901	1901	Emissionshandel	Great Aviation Countries	ATR20 High Price	2025	2025	681	2324	214	2095	5119	3491	1627	1627
Emissionshandel	Annex+Countries	ATR20 High Price	2030	2030	661	2086	213	1962	4921	4267	654	654	Emissionshandel	Great Aviation Countries	ATR20 High Price	2030	2030	636	2020	202	1872	4729	4466	264	264
Emissionshandel	Annex+Countries	ATR20 High Price	2010	2010	583	810	75	603	2071	277	1795	1795	Emissionshandel	Great Aviation Countries	ATR20 High Price	2010	2010	583	810	75	603	2071	284	1786	1786
Emissionshandel	Annex+Countries	ATR20 High Price	2015	2015	716	995	98	781	2591	1778	1812	1812	Emissionshandel	Great Aviation Countries	ATR20 High Price	2015	2015	715	994	98	779	2585	810	1775	1775
Emissionshandel	Annex+Countries	ATR20 High Price	2020	2020	820	1153	116	900	3010	1262	1747	1747	Emissionshandel	Great Aviation Countries	ATR20 High Price	2020	2020	816	1149	115	914	2994	1317	1678	1678
Emissionshandel	Annex+Countries	ATR20 High Price	2025	2025	880	1251	128	978	3273	1649	1588	1588	Emissionshandel	Great Aviation Countries	ATR20 High Price	2025	2025	873	1243	126	967	3209	1722	1488	1488
Emissionshandel	Annex+Countries	ATR20 High Price	2030	2030	947	1366	140	1014	3467	2122	1345	1345	Emissionshandel	Great Aviation Countries	ATR20 High Price	2030	2030	935	1351	137	998	3421	2217	1204	1204
Emissionshandel	Annex+Countries	ATR20 High Price	2010	2010	585	1783	165	1722	4255	566	3698	3698	Emissionshandel	Great Aviation Countries	ATR20 High Price	2010	2010	585	1783	165	1721	4254	581	3673	3673
Emissionshandel	Annex+Countries	ATR20 High Price	2015	2015	738	2209	222	2247	5394	2572	2822	2822	Emissionshandel	Great Aviation Countries	ATR20 High Price	2015	2015	737	2203	222	2266	5478	1658	3805	3805
Emissionshandel	Annex+Countries	ATR20 High Price	2020	2020	820	1153	116	900	3010	1262	1747	1747	Emissionshandel	Great Aviation Countries	ATR20 High Price	2020	2020	820	1153	116	900	3010	1262	1747	1747
Emissionshandel	Annex+Countries	ATR20 High Price	2025	2025	880	1251	128	978	3273	1649	1588	1588	Emissionshandel	Great Aviation Countries	ATR20 High Price	2025	2025	880	1251	128	978	3273	1649	1588	1588
Emissionshandel	Annex+Countries	ATR20 High Price	2030	2030	947	1366	140	1014	3467	2122	1345	1345	Emissionshandel	Great Aviation Countries	ATR20 High Price	2030	2030	947	1366	140	1014	3467	2122	1345	1345
Emissionshandel	Annex+Countries	ATR20 High Price	2010	2010	585	1783	165	1722	4255	566	3698	3698	Emissionshandel	Great Aviation Countries	ATR20 High Price	2010	2010	585	1783	165	1721	4254	581	3673	3673
Emissionshandel	Annex+Countries	ATR20 High Price	2015	2015	738	2209	222	2247	5394	2572	2822	2822	Emissionshandel	Great Aviation Countries	ATR20 High Price	2015	2015	737	2203	222	2266	5478	1658	3805	3805
Emissionshandel	Annex+Countries	ATR20 High Price	2020	2020	820	1153	116	900	3010	1262	1747	1747	Emissionshandel	Great Aviation Countries	ATR20 High Price	2020	2020	820	1153	116	900	3010	1262	1747	1747
Emissionshandel	Annex+Countries	ATR20 High Price	2025	2025	880	1251	128	978	3273	1649	1588	1588	Emissionshandel	Great Aviation Countries	ATR20 High Price	2025	2025	880	1251	128	978	3273	1649	1588	1588
Emissionshandel	Annex+Countries	ATR20 High Price	2030	2030	947	1366	140	1014	3467	2122	1345	1345	Emissionshandel	Great Aviation Countries	ATR20 High Price	2030	2030	947	1366	140	1014	3467	2122	1345	1345
Emissionshandel	Annex+Countries	ATR20 High Price	2010	2010	585	1783	165	1722	4255	566	3698	3698	Emissionshandel	Great Aviation Countries	ATR20 High Price	2010	2010	585	1783	165	1721	4254	581	3673	3673
Emissionshandel	Annex+Countries	ATR20 High Price	2015	2015	738	2209	222	2247	5394	2572	2822	2822	Emissionshandel	Great Aviation Countries	ATR20 High Price	2015	2015	737	2203	222	2266	5478	1658	3805	3805
Emissionshandel	Annex+Countries	ATR20 High Price	2020	2020	820	1153	116	900	3010	1262	1747	1747	Emissionshandel	Great Aviation Countries	ATR20 High Price	2020	2020	820	1153	116	900	3010	1262	1747	1747
Emissionshandel	Annex+Countries	ATR20 High Price	2025	2025	880	1251	128	978	3273	1649	1588	1588	Emissionshandel	Great Aviation Countries	ATR20 High Price	2025	2025	880	1251	128	978	3273	1649	1588	1588
Emissionshandel	Annex+Countries	ATR20 High Price	2030	2030	947	1366	140	1014	3467	2122	1345	1345	Emissionshandel	Great Aviation Countries	ATR20 High Price	2030	2030	947	1366	140	1014	3467	2122	1345	1345
Emissionshandel	Annex+Countries	ATR20 High Price	2010	2010	585	1783	165	1722	4255	566	3698	3698	Emissionshandel	Great Aviation Countries	ATR20 High Price	2010	2010	585	1783	165	1721	4254	581	3673	3673
Emissionshandel	Annex+Countries	ATR20 High Price	2015	2015	738	2209	222	2247	5394	2572	2822	2822	Emissionshandel	Great Aviation Countries	ATR20 High Price	2015	2015	737	2203	222	2266	5478	1658	3805	3805
Emissionshandel	Annex+Countries	ATR20 High Price	2020	2020	820	1153	116	900	3010	1262	1747	1747	Emissionshandel	Great Aviation Countries	ATR20 High Price	2020	2020	820	1153	116	900	3010	1262	1747	1747
Emissionshandel	Annex+Countries	ATR20 High Price	2025	2025	880	1251	128	978	3273	1649	1588	1588	Emissionshandel	Great Aviation Countries	ATR20 High Price	2025	2025	880	1251	128	978	3273	1649	1588	1588
Emissionshandel	Annex+Countries	ATR20 High Price	2030	2030	947	1366	140	1014	3467	2122	1345	1345	Emissionshandel	Great Aviation Countries	ATR20 High Price	2030	2030	947	1366	140	1014	3467	2122	1345	1345
Emissionshandel	Annex+Countries	ATR20 High Price	2010	2010	585	1783	165	1722	4255	566	3698	3698	Emissionshandel	Great Aviation Countries	ATR20 High Price	2010	2010	585	1783	165	1721	4254	581	3673	3673
Emissionshandel	Annex+Countries	ATR20 High Price	2015	2015	738	2209	222	2247	5394	2572	2822	2822	Emissionshandel	Great Aviation Countries	ATR20 High Price	2015	2015	737	2203	222	2266	5478	1658	3805	3805
Emissionshandel	Annex+Countries	ATR20 High Price	2020	2020	820	1153	116	900	3010	1262	1747	1747	Emissionshandel	Great Aviation Countries	ATR20 High Price	2020	2020	820	1153	116	900	3010	1262	1747	1747
Emissionshandel	Annex+Countries	ATR20 High Price	2025	2025	880	1251	128	978	3273	1649	1588	1588	Emissionshandel	Great Aviation Countries	ATR20 High Price	2025	2025	880	1251	128	978	3273	1649	1588	1588
Emissionshandel	Annex+Countries	ATR20 High Price	2030	2030	947	1366	140	1014	3467	2122	1345	1345	Emissionshandel	Great Aviation Countries	ATR20 High Price	2030	2030	947	1366	140	1014	3467	2122	1345	1345
Emissionshandel	Annex+Countries	ATR20 High Price	2010	2010	585	1783	165	1722	4255	566	3698	3698	Emissionshandel	Great Aviation Countries	ATR20 High Price	2010	2010	585	1783	165	1721	4254	581	3673	3673
Emissionshandel	Annex+Countries	ATR20 High Price	2015	2015																					

Tabelle A-2: Durch Maßnahmen reduzierte CO₂-Äquivalente (2)

Maßnahme	Szenario	Metrik	Preis	Elastizität	Jahr	CO ₂	Cont	H2O	Nox	GesamtOhneZukauf	Zukauf	GesamtMitZukauf	Maßnahme	Szenario	Metrik	Preis	Elastizität	Jahr	CO ₂	Cont	H2O	Nox	GesamtOhneZukauf	Zukauf	GesamtMitZukauf
Emissionshandel	Greater Europe	ATRSO	High Price	Fall 2	2010	587	1787	165	1726	4266	217	4049	Emissionshandel	World	ATRSO	High Price	Fall 2	2010	584	1782	165	1720	4251	633	3618
Emissionshandel	Greater Europe	ATRSO	High Price	Fall 2	2015	746	2277	223	2288	5534	553	4980	Emissionshandel	World	ATRSO	High Price	Fall 2	2015	720	2200	216	2214	5351	1831	3520
Emissionshandel	Greater Europe	ATRSO	High Price	Fall 2	2020	895	2767	277	2806	6744	874	5870	Emissionshandel	World	ATRSO	High Price	Fall 2	2020	829	2564	258	2611	6262	2989	3273
Emissionshandel	Greater Europe	ATRSO	High Price	Fall 2	2025	1014	3176	321	3138	7649	1125	6524	Emissionshandel	World	ATRSO	High Price	Fall 2	2025	896	2803	286	2789	6774	3900	2874
Emissionshandel	Greater Europe	ATRSO	High Price	Fall 2	2030	1160	3690	373	3457	8679	1415	7264	Emissionshandel	World	ATRSO	High Price	Fall 2	2030	972	3086	316	2919	7292	5007	2285
Emissionshandel	Greater Europe	ATRSO	High Price	Fall 2	2010	588	814	75	607	2085	106	1979	Emissionshandel	World	ATRSO	High Price	Fall 2	2010	587	815	76	607	2084	310	1774
Emissionshandel	Greater Europe	ATRSO	High Price	Fall 2	2015	751	1044	103	818	2715	273	2443	Emissionshandel	World	ATRSO	High Price	Fall 2	2015	739	1028	101	807	2674	897	1778
Emissionshandel	Greater Europe	ATRSO	High Price	Fall 2	2020	908	1277	128	1016	3329	432	2898	Emissionshandel	World	ATRSO	High Price	Fall 2	2020	876	1233	124	984	3216	1465	1751
Emissionshandel	Greater Europe	ATRSO	High Price	Fall 2	2025	1038	1477	150	1151	3815	560	3255	Emissionshandel	World	ATRSO	High Price	Fall 2	2025	979	1394	142	1091	3606	1925	1681
Emissionshandel	Greater Europe	ATRSO	High Price	Fall 2	2030	1195	1728	176	1279	4378	710	3667	Emissionshandel	World	ATRSO	High Price	Fall 2	2030	1102	1592	163	1186	4043	2487	1556
Emissionshandel	Greater Europe	ATRSO	High Price	Fall 3	2010	584	1779	165	1717	4244	217	4027	Emissionshandel	World	ATRSO	High Price	Fall 3	2010	575	1755	163	1695	4188	633	3555
Emissionshandel	Greater Europe	ATRSO	High Price	Fall 3	2015	728	2225	217	2227	5398	553	4844	Emissionshandel	World	ATRSO	High Price	Fall 3	2015	660	2015	198	2028	4901	1831	3071
Emissionshandel	Greater Europe	ATRSO	High Price	Fall 3	2020	852	2642	262	2658	6414	874	5541	Emissionshandel	World	ATRSO	High Price	Fall 3	2020	680	2103	212	2141	5336	2989	2147
Emissionshandel	Greater Europe	ATRSO	High Price	Fall 3	2025	939	2954	294	2880	7067	1125	5942	Emissionshandel	World	ATRSO	High Price	Fall 3	2025	629	1969	201	1959	4758	3900	858
Emissionshandel	Greater Europe	ATRSO	High Price	Fall 3	2030	1044	3343	330	3074	7791	1415	6376	Emissionshandel	World	ATRSO	High Price	Fall 3	2030	552	1752	179	1658	4141	5007	-866
Emissionshandel	Greater Europe	ATRSO	High Price	Fall 3	2010	586	813	75	605	2080	106	1973	Emissionshandel	World	ATRSO	High Price	Fall 3	2010	582	809	75	603	2069	310	1759
Emissionshandel	Greater Europe	ATRSO	High Price	Fall 3	2015	743	1032	101	807	2683	273	2410	Emissionshandel	World	ATRSO	High Price	Fall 3	2015	709	986	97	774	2567	897	1670
Emissionshandel	Greater Europe	ATRSO	High Price	Fall 3	2020	887	1249	125	990	3250	432	2819	Emissionshandel	World	ATRSO	High Price	Fall 3	2020	803	1130	114	902	2948	1465	1483
Emissionshandel	Greater Europe	ATRSO	High Price	Fall 3	2025	1000	1426	144	1103	3674	560	3114	Emissionshandel	World	ATRSO	High Price	Fall 3	2025	848	1207	123	945	3122	1925	1197
Emissionshandel	Greater Europe	ATRSO	High Price	Fall 3	2030	1137	1648	166	1208	4160	710	3449	Emissionshandel	World	ATRSO	High Price	Fall 3	2030	893	1293	132	961	3278	2487	791
Emissionshandel	Greater Europe	ATRSO	Low Price	Fall 2	2010	587	1787	165	1726	4266	217	4049	Emissionshandel	World	ATRSO	Low Price	Fall 2	2010	584	1782	165	1720	4251	633	3618
Emissionshandel	Greater Europe	ATRSO	Low Price	Fall 2	2015	728	2225	217	2227	5398	553	4844	Emissionshandel	World	ATRSO	Low Price	Fall 2	2015	739	1028	101	807	2674	897	1778
Emissionshandel	Greater Europe	ATRSO	Low Price	Fall 2	2020	908	1277	128	1016	3329	432	2898	Emissionshandel	World	ATRSO	Low Price	Fall 2	2020	876	1233	124	984	3216	1465	1751
Emissionshandel	Greater Europe	ATRSO	Low Price	Fall 2	2025	1038	1477	150	1151	3815	560	3255	Emissionshandel	World	ATRSO	Low Price	Fall 2	2025	979	1394	142	1091	3606	1925	1681
Emissionshandel	Greater Europe	ATRSO	Low Price	Fall 2	2030	1195	1728	176	1279	4378	710	3667	Emissionshandel	World	ATRSO	Low Price	Fall 2	2030	1102	1592	163	1186	4043	2487	1556
Emissionshandel	Greater Europe	ATRSO	Low Price	Fall 3	2010	584	1779	165	1717	4244	217	4027	Emissionshandel	World	ATRSO	Low Price	Fall 3	2010	575	1755	163	1695	4188	633	3555
Emissionshandel	Greater Europe	ATRSO	Low Price	Fall 3	2015	728	2225	217	2227	5398	553	4844	Emissionshandel	World	ATRSO	Low Price	Fall 3	2015	660	2015	198	2028	4901	1831	3071
Emissionshandel	Greater Europe	ATRSO	Low Price	Fall 3	2020	852	2642	262	2658	6414	874	5541	Emissionshandel	World	ATRSO	Low Price	Fall 3	2020	680	2103	212	2141	5336	2989	2147
Emissionshandel	Greater Europe	ATRSO	Low Price	Fall 3	2025	939	2954	294	2880	7067	1125	5942	Emissionshandel	World	ATRSO	Low Price	Fall 3	2025	629	1969	201	1959	4758	3900	858
Emissionshandel	Greater Europe	ATRSO	Low Price	Fall 3	2030	1044	3343	330	3074	7791	1415	6376	Emissionshandel	World	ATRSO	Low Price	Fall 3	2030	552	1752	179	1658	4141	5007	-866
Emissionshandel	Greater Europe	ATRSO	Low Price	Fall 3	2010	586	813	75	605	2080	106	1973	Emissionshandel	World	ATRSO	Low Price	Fall 3	2010	582	809	75	603	2069	310	1759
Emissionshandel	Greater Europe	ATRSO	Low Price	Fall 3	2015	743	1032	101	807	2683	273	2410	Emissionshandel	World	ATRSO	Low Price	Fall 3	2015	709	986	97	774	2567	897	1670
Emissionshandel	Greater Europe	ATRSO	Low Price	Fall 3	2020	887	1249	125	990	3250	432	2819	Emissionshandel	World	ATRSO	Low Price	Fall 3	2020	803	1130	114	902	2948	1465	1483
Emissionshandel	Greater Europe	ATRSO	Low Price	Fall 3	2025	1000	1426	144	1103	3674	560	3114	Emissionshandel	World	ATRSO	Low Price	Fall 3	2025	848	1207	123	945	3122	1925	1197
Emissionshandel	Greater Europe	ATRSO	Low Price	Fall 3	2030	1137	1648	166	1208	4160	710	3449	Emissionshandel	World	ATRSO	Low Price	Fall 3	2030	893	1293	132	961	3278	2487	791
Emissionshandel	Greater Europe	ATRSO	Low Price	Fall 2	2010	587	1787	165	1726	4266	217	4049	Emissionshandel	World	ATRSO	Low Price	Fall 2	2010	584	1782	165	1720	4251	633	3618
Emissionshandel	Greater Europe	ATRSO	Low Price	Fall 2	2015	728	2225	217	2227	5398	553	4844	Emissionshandel	World	ATRSO	Low Price	Fall 2	2015	739	1028	101	807	2674	897	1778
Emissionshandel	Greater Europe	ATRSO	Low Price	Fall 2	2020	908	1277	128	1016	3329	432	2898	Emissionshandel	World	ATRSO	Low Price	Fall 2	2020	876	1233	124	984	3216	1465	1751
Emissionshandel	Greater Europe	ATRSO	Low Price	Fall 2	2025	1038	1477	150	1151	3815	560	3255	Emissionshandel	World	ATRSO	Low Price	Fall 2	2025	979	1394	142	1091	3606	1925	1681
Emissionshandel	Greater Europe	ATRSO	Low Price	Fall 2	2030	1195	1728	176	1279	4378	710	3667	Emissionshandel	World	ATRSO	Low Price	Fall 2	2030	1102	1592	163	1186	4043	2487	1556
Emissionshandel	Greater Europe	ATRSO	Low Price	Fall 3	2010	584	1779	165	1717	4244	217	4027	Emissionshandel	World	ATRSO	Low Price	Fall 3	2010	575	1755	163	1695	4188	633	3555
Emissionshandel	Greater Europe	ATRSO	Low Price	Fall 3	2015	743	1032	101	807	2683	273	2410	Emissionshandel	World	ATRSO	Low Price	Fall 3	2015	709	986	97	774	2567	897	1670
Emissionshandel	Greater Europe	ATRSO	Low Price	Fall 3	2020	887	1249	125	990	3250	432	2819	Emissionshandel	World	ATRSO	Low Price	Fall 3	2020	803	1130	114	902	2948	1465	1483
Emissionshandel	Greater Europe	ATRSO	Low Price	Fall 3	2025	1000	1426	144	1103	3674	560	3114	Emissionshandel	World	ATRSO	Low Price	Fall 3	2025	848	1207	123	945	3122	1925	1197
Emissionshandel	Greater Europe	ATRSO	Low Price	Fall 3	2030	1137	1648	166	1208	4160	710	3449	Emissionshandel	World	ATRSO	Low Price	Fall 3	2030	893	1293	132	961	3278	2487	791
Emissionshandel	Greater Europe	ATRSO	Low Price	Fall 2	2010	587	1787	165	1726	4266	217	4049	Emissionshandel	World	ATRSO	Low Price	Fall 2	2010	584	1782	165	1720	4251	633	3618
Emissionshandel	Greater Europe	ATRSO	Low Price	Fall 2	2015	728	2225	217	2227	5398	553	4844	Emissionshandel	World	ATRSO	Low Price	Fall 2	2015	739	1028	101	807	2674	897	1778
Emissionshandel	Greater Europe	ATRSO	Low Price	Fall 2	2020	908	1277	128	1016	3329	432	2898	Emissionshandel	World	ATRSO	Low Price	Fall 2	2020	876	1233	124	984	3216	1465	1751
Emissionshandel	Greater Europe	ATRSO	Low Price	Fall 2	2025	1038	1477	150	1151	3815	560	3255	Emissionshandel	World	ATRSO	Low Price	Fall 2	2025	979	1394	142	1091	3606	19	

Tabelle A-3: Szenarien-spezifische Umrechnungsfaktoren für Septemberwerte auf Jahreswerte bezüglich der geflogenen Distanz, der Gesamtverkehrsleistung (Revenue Ton Kilometers), dem Kerosinverbrauch und der NO_x-Emissionen

<i>Scenario</i>	<i>Distance</i>	<i>RTKs</i>	<i>Fuel</i>	<i>NO_x</i>
Greater EU	11.12	11.27	11.27	11.27
Annex I Countries	11.75	11.70	11.74	11.72
Great Aviation Countries	11.74	11.68	11.73	11.70
World	11.76	11.70	11.75	11.72
-(Greater EU)	12.05	-	12.01	11.98
-(Annex I Countries)	11.81	-	11.79	11.78
-(Big Aviation Countries)	11.93	-	11.92	11.89

Quelle: Eigene Berechnungen.

Tabelle A-4: Entwicklung der Verkehrsleistung, Preiselastizität = -0,8; in Mrd. RTKs; High Price Scenario

	Scenario „Greater EU“, atr 20			Scenario „Greater EU“, atr 50			Scenario „Great Aviation Countries“, atr 20			Scenario „Great Aviation Countries“, atr 50		
Year	Climate Tax	Emissions Trading	NO _x -Charge	Climate Tax	Emissions Trading	NO _x -Charge	Climate Tax	Emissions Trading	NO _x -Charge	Climate Tax	Emissions Trading	NO _x -Charge
2010	207	218	214	214	219	217	523	551	542	540	554	551
2015	243	269	261	262	275	273	629	700	687	683	718	715
2020	282	324	315	319	339	337	739	852	845	844	899	901
2025	318	382	372	380	411	410	838	1008	1014	1016	1099	1110
2030	364	449	445	456	497	500	962	1189	1230	1232	1343	1374
	Scenario „Annex-I Countries“, atr 20			Scenario „Annex-I Countries; atr 50			Scenario „World“, atr 20			Scenario „World“, atr 50		
2010	506	534	525	523	536	533	566	597	588	585	600	597
2015	606	675	662	659	692	690	685	762	748	744	782	779
2020	711	821	814	812	866	868	806	929	923	922	982	985
2025	804	970	975	976	1057	1068	914	1099	1110	1111	1201	1215
2030	922	1143	1183	1183	1291	1320	1049	1296	1348	1349	1469	1506

Quelle: Eigene Berechnungen. In Preisen von 2012.

Tabelle A-5: Entwicklung der Verkehrsleistung, Preiselastizität = -2;1 in Mrd. RTKs; High Price Scenario

	Scenario „Greater EU“, atr 20			Scenario „Greater EU“, atr 50			Scenario „Great Aviation Countries“, atr 20			Scenario „Great Aviation Countries“, atr 50		
Year	Climate Tax	Emissions Trading	NO _x -Charge	Climate Tax	Emissions Trading	NO _x -Charge	Climate Tax	Emissions Trading	NO _x -Charge	Climate Tax	Emissions Trading	NO _x -Charge
2010	187	215	205	204	217	214	469	543	520	513	550	543
2015	180	250	229	232	266	260	456	642	607	599	690	682
2020	164	275	251	261	315	310	404	702	682	680	826	831
2025	121	288	262	283	364	361	268	715	731	736	955	984
2030	69	291	280	309	418	425	94	689	799	804	1095	1175
	Scenario „Annex-I Countries“, atr 20			Scenario „Annex-I Countries; atr 50			Scenario „World“, atr 20			Scenario „World“, atr 50		
2010	453	526	503	497	532	525	507	588	563	556	596	588
2015	438	620	586	577	665	658	495	698	661	651	750	743
2020	387	677	658	654	796	800	438	762	745	742	900	908
2025	255	690	704	706	919	947	286	772	800	802	1040	1077
2030	86	666	770	770	1053	1130	88	736	874	874	1191	1287

Quelle: Eigene Berechnungen. In Preisen von 2012.

Tabelle A-6: Entwicklung der Verkehrsleistung, Preiselastizität = -0,8; in Mrd. RTKs; Mixed Price Scenario

	Scenario „Greater EU“, atr 20			Scenario „Greater EU“, atr 50			Scenario „Great Aviation Countries“, atr 20			Scenario „Great Aviation Countries“, atr 50		
Year	Climate Tax	Emissions Trading	NO _x -Charge	Climate Tax	Emissions Trading	NO _x -Charge	Climate Tax	Emissions Trading	NO _x -Charge	Climate Tax	Emissions Trading	NO _x -Charge
2010	207	218	214	214	219	217	523	551	542	540	554	551
2015	243	274	262	262	278	274	629	714	689	683	725	717
2020	282	339	317	319	347	340	739	898	851	844	922	908
2025	318	416	378	380	428	415	838	1113	1029	1016	1151	1125
2030	364	510	455	456	528	510	962	1381	1258	1232	1439	1402
	Scenario „Annex-I Countries“, atr 20			Scenario „Annex-I Countries; atr 50			Scenario „World“, atr 20			Scenario „World“, atr 50		
2010	506	534	525	523	536	533	566	597	588	585	600	597
2015	606	689	664	659	699	692	685	777	750	744	790	781
2020	711	865	820	812	888	874	806	981	930	922	1007	992
2025	804	1070	990	976	1107	1082	914	1217	1127	1111	1259	1232
2030	922	1327	1210	1183	1382	1347	1049	1511	1380	1349	1576	1537

Quelle: Eigene Berechnungen. In Preisen von 2012.

Tabelle A-7: Entwicklung der Verkehrsleistung, Preiselastizität = -2;1 in Mrd. RTKs; Mixed Price Scenario

	Scenario „Greater EU“, atr 20			Scenario „Greater EU“, atr 50			Scenario „Great Aviation Countries“, atr 20			Scenario „Great Aviation Countries“, atr 50		
Year	Climate Tax	Emissions Trading	NO _x -Charge	Climate Tax	Emissions Trading	NO _x -Charge	Climate Tax	Emissions Trading	NO _x -Charge	Climate Tax	Emissions Trading	NO _x -Charge
2010	187	215	205	204	217	214	469	543	520	513	550	543
2015	180	262	231	232	272	262	456	679	613	599	708	688
2020	164	315	257	261	335	316	404	823	700	680	885	848
2025	121	376	276	283	408	375	268	991	771	736	1091	1023
2030	69	450	306	309	498	450	94	1193	873	804	1346	1249
	Scenario „Annex-I Countries“, atr 20			Scenario „Annex-I Countries; atr 50			Scenario „World“, atr 20			Scenario „World“, atr 50		
2010	453	526	503	497	532	525	507	588	563	556	596	588
2015	438	655	591	577	683	663	495	739	667	651	771	749
2020	387	793	674	654	853	817	438	897	764	742	966	927
2025	255	954	743	706	1049	985	286	1080	844	802	1192	1121
2030	86	1148	841	770	1293	1201	88	1301	957	874	1472	1370

Quelle: Eigene Berechnungen. In Preisen von 2012.